

Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften

Institut für Geographie

Brandflächendetektion im mediterranen Raum auf Basis von SPOT 5 und TerraSAR-X Satellitendaten

Diplomarbeit

eingereicht von Eva-Maria Bernhard

Diplomarbeit betreut von:

Dr. Johann Stötter

Dr. Monika Gähler

München, September 2010

Danksagung

Zu Beginn dieser Diplomarbeit möchte ich allen einen herzlichen Dank aussprechen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Hier sei vor allem das Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt genannt, in dessen Kontext diese Arbeit entstanden ist. Ohne die Bereitstellung umfangreicher Datenmaterialien wäre eine Umsetzung nicht möglich gewesen. Für die nette Arbeitsatmosphäre und zahlreiche Hilfestellungen bereits während meines Praktikums und anschließend während meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Abteilung zivile Kriseninformation und Georisikan recht herzlich Bedanken. Besonders möchte ich hier meine Betreuer Dr. Monika Gähler, André Twele und Enrico Stein nennen, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und mich bei vielen Fragestellungen unterstützt haben.

Vielen Dank an alle meine Freunde, die mich bis an mein Studiumsende begleitet haben, und in freudigen und ernsten Zeiten stets für mich da waren. Ein großes Dankeschön gilt hier insbesondere Teresa Dorfner, die mich in manch zweifelnder Stunde beraten und aufgemuntert hat.

VON HERZEN DANKEN möchte ich meiner ganzen Familie und insbesondere meinen Eltern Magdalena und Max Bernhard, die mir durch Rat und Tat auf meinem gesamten Lebensweg zur Seite standen und mich stets bedingungslos unterstützt haben. Nur durch Ihre Hilfe und Ihren Rückhalt war es mir möglich mein Studium abzuschließen und schließlich diese Diplomarbeit zu verwirklichen.

Kurzfassung

Waldbrände stellen nicht nur während des Feuers eine akute Bedrohung für Land und Leben dar, sondern tragen auch zu Langzeitschäden wie vermehrter Erosion, Degradation, Veränderung des Bodenhaushalts und der Klimaerwärmung durch starken CO_2 -Ausstoß bei. Eine schnelle und genaue Erfassung der Brandflächen ist sowohl für die Ersthilfe vor Ort, als auch für Folgeuntersuchungen und –hilfsmaßnahmen unerlässlich. Hierbei bietet die Fernerkundung ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten.

Im mediterranen Raum wurden im Jahr 2009 323 896 Hektar durch Waldbrände zerstört (JRC 2009). Im Zuge verheerender Waldbrände in Griechenland, Spanien und Italien im August 2009 wurde die internationale Charter *Space and Major Disasters* ausgelöst, und damit das Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit der Katastrophen-Schnellkartierung dieser Gebiete beauftragt. Die Kartierung wurde auf der Datengrundlage von SPOT 5, ALOS AVNIR-2 und IKONOS Satellitenbilddaten durchgeführt. Durch Bewölkung und spektral einer Brandfläche ähnlichen Gebieten wie zum Beispiel Wolkenschatten, Küstenbereichen und Freiflächen, führte das bestehende *Fire-Tool* des ZKI zu zahlreichen Fehlklassifikationen.

Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt darauf, diese Schwachstellen zu beseitigen, und einen robusten, schnellen, jedoch genauen und übertragbaren Algorithmus zur Brandflächendetektion im mediterranen Raum zu entwickeln. Der aktuelle Stand der Forschung zeigt das größte Potential diesen Schwierigkeiten zu begegnen in einer Zuhilfenahme des mittleren Infrarots, multitemporaler Analysen und einer Kombination aus optischen und Radar-Daten. Der entwickelte Algorithmus basiert daher auf SPOT 5 und TerraSAR-X Satellitenbilddaten. Aufgrund der relativ kurzen Orbit-Zeit von TerraSAR-X gilt es im Zuge dieser Arbeit zu ermitteln, ob dieser Sensor überhaupt und, wenn ja, wie genau zur Brandflächendetektion verwendet werden kann. Letztendlich werden im Rahmen dieser Diplomarbeit drei verschiedene Algorithmen zur Brandflächendetektion entwickelt.

Das optische Verfahren beruht in der monotemporalen Analyse auf den Indices *MSAVI*, *BAI* und *NDSWIR*, und in der multitemporalen Analyse auf deren Pendant *dMSAVI*, *dBAI* und *dNDSWIR*. Für beide Klassifikationen können Genauigkeiten von 99 % erzielt werden.

Das Radar-Verfahren zur Brandflächendetektion stützt sich auf eine multitemporale Veränderungsanalyse. Hierbei kann eine Klassifikationsgenauigkeit von 78 % erreicht werden. Dieses Genauigkeitsergebnis zeigt klar die Limitierungen von Radar-Daten zur räumlich exakten Kartierung von Feuerflächen auf.

Das dritte Verfahren nutzt deswegen in einer Kombination aus dem optischen und dem Radar-Verfahren die hohe räumliche Genauigkeit des optischen Algorithmus, und greift bei störenden Wolken oder deren Schatten auf Radar-Daten zurück, die diese Bereiche aufgrund der Mikrowellenstrahlung mühelos durchdringen können. Eine Validierung des Ergebnisses ist mangels Referenzflächen für dieses Verfahren nicht möglich.

Um die Benutzung des Verfahrens zu vereinfachen, beschleunigen, und verschiedenen Anwendern die ZKI-Notfallkartierung so leicht wie möglich zu gestalten, wurde für den entwickelten Algorithmus eine Benutzeroberfläche generiert.

Somit erweist sich der objekt-basierte, semi-automatische, mono- und multitemporale Algorithmus, der sowohl auf optischen als auch auf Radar-Satellitendaten beruht, als ein effizientes *Tool* zur Katastrophen-Schnellkartierung von Brandflächen im mediterranen Raum. Dadurch können nicht nur die Anwender des ZKI, sondern auch die Ersthelfer und damit die betroffene Bevölkerung vor Ort unterstützt werden.

Abstract

Forest fires do not only pose an urgent threat to land and life but also cause long-term damage to vegetation and soil moisture. Fires also contribute to an increased erosion and degradation and affect global warming due to rising CO₂-emissions. A fast and exact detection of the areas consumed by fire is indispensable both for on-site help and for an assessment of the aftermath.

In the Mediterranean region forest fires destroyed 323 896 hectares of land in the year 2009 (JRC 2009). In the course of devastating forest fires in Greece, Spain and Italy in August 2009, the international charter *Space and Major Disasters* was established. The *Center for Satellite Based Crisis Information* (ZKI) of the *German Aerospace Center* (DLR) was assigned to detect the burned areas. The so-called rapid mapping was based on SPOT 5, ALOS AVNIR-2 und IKONOS data. However, clouds and spectral similar regions led to misclassifications of areas that were difficult to distinguish such as cloud shadows, rimland and open space.

Thus the main focus of this thesis is on the reduction of these weaknesses and on the development of a robust and fast but at the same time precise and transferable algorithm for the detection of burned areas in the Mediterranean region. Latest research shows that the middle infrared, multitemporal analyses and a combination of optical and radar data offer the best chances to overcome these weaknesses. Thus the developed algorithm is based on SPOT 5 and TerraSAR-X data. As the orbit time of TerraSAR-X started only recently it had to be determined whether this Satellite can detect burned areas at all and if yes, how exactly. Finally, three different algorithms for the detection of burned areas have been developed within the framework of this thesis.

The optical technique is based on the monotemporal data spectra of the indices *MSAVI*, *BAI* and *NDSWIR*. In the multitemporal data analysis it is based on their counterpart *dMSAVI*, *dBAI* and *dNDSWIR*. Within the scope of both classifications the burned area can be detected with an accuracy of 99%.

The radar technique is based on a multitemporal change detection analysis. At this the reached accuracy was 78%. This result clearly points at the limitations as for the accurate mapping of burned areas with microwaves.

Therefore the third technique constitutes a combination of the optical and the radar technique which takes advantage of both the optical accuracy and the ability of microwaves to penetrate clouds. A validation of this technique was not possible because of a lack of reference data.

In order to simplify the algorithm and to make it as simple as possible for users to access the ZKI rapid mapping, a user interface has been developed.

Finally it can be said that the object-based, semi-automatic, mono- and multitemporal algorithm which is based on optical as well as on radar data is a highly useful tool for the rapid mapping of burned areas in the Mediterranean region.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Feuerhäufigkeit im Mittelmeerraum.....	- 3 -
Abbildung 1-2:	Vegetation und Erosion im Bereich der Brandfläche 2009 in La Palma.....	- 6 -
Abbildung 2-1:	TerraSAR-X Datengrundlage 2009 in Griechenland.....	- 17 -
Abbildung 2-2:	Gebietsüberblick der Brandfläche in Griechenland.....	- 20 -
Abbildung 2-3:	Gebietsüberblick der Brandfläche in La Palma.....	- 22 -
Abbildung 3-1:	Elektromagnetische Welle.....	- 23 -
Abbildung 3-2:	Elektromagnetisches Spektrum.....	- 24 -
Abbildung 3-3:	Streuung und Absorption.....	- 26 -
Abbildung 3-4:	SPOT 5.....	- 33 -
Abbildung 3-5:	Aufnahmegeometrie von Radar-Systemen.....	- 39 -
Abbildung 3-6:	Radar-Rückstreuungseigenschaften.....	- 41 -
Abbildung 3-7:	Der TerraSAR-X Satellit mit verschiedenen Aufnahmemodi.....	- 45 -
Abbildung 4-1:	Sensorgeometrie La Palmas.....	- 53 -
Abbildung 4-2:	SPOT 5 Satellitenbildszenen La Palmas vor und nach der Atmosphärenkorrektur.....	- 56 -
Abbildung 4-3:	<i>Speckle</i> -Reduktion der TerraSAR-X Satellitenbildszene in Griechenland vom 29.08.2009.....	- 59 -
Abbildung 5-1:	Unüberwachte Klassifikation.....	- 65 -
Abbildung 5-2:	Reflexionsmittelwerte der SPOT 5 Satellitenbildszene in Griechenland.....	- 66 -
Abbildung 5-3:	Trennbarkeitspotential der Klasse „Brand“.....	- 67 -
Abbildung 5-4:	Schema des optischen Algorithmus.....	- 72 -
Abbildung 5-5:	Multiresolution Segmentation.....	- 74 -
Abbildung 5-6:	Klassifikationsergebnis des optischen, monotemporalen Algorithmus.....	- 79 -
Abbildung 5-7:	Klassifizierte Brandfläche in La Palma.....	- 83 -

Abbildung 5-8:	Action Library.....	- 85 -
Abbildung 5-9:	Rückstreuung der TerraSAR-X Satellitenbildszene in Griechenland.....	- 88 -
Abbildung 5-10:	Rückstreuung verschiedener Polarisationen.....	- 89 -
Abbildung 5-11:	Rückstreuung der TerraSAR-X Satellitenbildszenen in La Palma.....	- 90 -
Abbildung 5-12:	Visualisierung der Brandfläche in Griechenland mit TerraSAR-X.....	- 91 -
Abbildung 5-13:	Schema des Radar-Algorithmus zur Brandflächendetektion.....	- 92 -
Abbildung 5-14:	Differenzbild der TerraSAR-X Satellitenbildszenen vom 13.5.2008 und 29.08.2009 in Griechenland.....	- 94 -
Abbildung 5-15:	Brandfläche der Radar-Klassifikation im Vergleich.....	- 96 -
Abbildung 5-16:	Überlagerte Radar-Brandfläche in La Palma (Bandkombination SWIR, NIR, grün).....	- 98 -
Abbildung 5-17:	Schema der Kombination des optischen- und Radarverfahrens.....	- 100 -
Abbildung 5-18:	Synergie zwischen optischer- und Radar- Brandflächendetektion.....	- 102 -
Abbildung 7-1:	Verbrannte Landbedeckung in La Palma nach CORINE.....	- 110 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Datengrundlage.....	- 16 -
Tabelle 2-2:	TerraSAR-X Datengrundlage.....	- 16 -
Tabelle 3-1:	Stand der Forschung optische Brandflächendetektion....	- 31/32 -
Tabelle 3-2:	Bänder von Radar-Satelliten.....	- 40 -
Tabelle 3-3:	Stand der Forschung Radar-Brandflächendetektion.....	- 44 -
Tabelle 5-1:	Indices zur Brandflächendetektion.....	- 69 -
Tabelle 6-1:	Genauigkeitsanalyse.....	- 106 -
Tabelle 6-2:	Übertragbarkeit der Verfahren.....	- 107 -
Tabelle 7-1:	Landbedeckung des verbrannten Gebietes in Griechenland.....	- 111 -

Abkürzungsverzeichnis

ARVI	A tmospherically R esistent V egetation I ndex
ASTER	A dvanced S paceborn T hermal E mission and R eflection Radiometer
ATCOR	A tmospheric/ T opographic COR rection
AVHRR	A dvanced V ery H igh R esolution R adiometer
AVIRIS	A irborne V isible and I nfrared I maging S pectrometer
AVNIR-2	A dvanced V isible and N ear I nfrared R adiometer - 2
BAI	B urned A rea I ndex
Bit	BI nary digi T
BRDF	B idirectional R eflectance D istribution F unction
CNES	C entre N ational d'Études S patiales
CNSA	C hina N ational S pace A dministration
CONAE	Argentina`s CO misión N acional de A ctividades E spaciales
CORINE	CO o R dination of I Nformation on the E nvironment
CSA	C anadian S pace A gency
d_norm_SWIR	D ifferenced norm alized S hort W ave I nfra R ed
dB	De zi Bel
dbAI	D ifferenced B urned A rea I ndex
DFD	D eutsches F ernerkundungs D atenzentrum
DLR	D eutsches Zentrum für L uft- und R aumfahrt
DMC	D isaster M onitoring C onstellation
dMSAVI	D ifferenced M odified S oil A ddjusted V egetation I ndex
DMSP-OLS	D efense M eteorological S atellite P rogram – O perational L inescan S ystem
DN	D igital N umber
dNDSWIR	D ifferenced N ormalized D ifference S hort W ave I nfra R ed I ndex
EEC	E nhanced E llipsoid C orrected
EFFIS	E uropean F orest F ires I nformation S ervice
ERS 1&2	E uropean R emote S ensing S atellite 1&2
ESA	E uropean S pace A gency
EU	E uropäische U nion
FAO	F ood and A griculture O rganization of the U nited N ations
GEC	G eocoded E llipsoid C orrected
GEMI	G lobal E nvironmental M onitoring I ndex
GMES	G lobal M onitoring of E nvironment and S ecurity
HRG	H igh R esolution G eometry
HRS	H igh R esolution S tereo I nstrument

IPCC	I ntergovernmental P anel on C limate C hange
IRS-P6	I ndian R emote S ensing S atellite
ISRO	I ndian S pace R esearch O rganisation
ITC	I nnertropical K onvergenzzone
JAXA	J apan A erospace E Xploration A gency
JERS 1	J apanese E arth R esources S atellite
JRC	J oint R esearch C enter
MERIS	M edium R esolution I maging S pectrometer
MGD	M ulti look G round range D etected
MODIS	M ODerate Resolution I maging S pectrometer
MODTRAN	M ODerate resolution atmospheric T RANsmission
MSAVI	M odified S oil A ddjusted V egetation I ndex
NBR	N ormalized B urn R atio
NDSWIR	N ormalized D ifference S hortWave I nfra R ed Index
NDVI	N ormalized D ifference V egetation I ndex
NIR	N ear I nfra R ed / N ahes I nfra R ot
NOAA	N ational O ceanic and A tmospheric A dministration
Norm_SWIR	n ormalized S hortWave I nfra R ed
PCA	P rincipal C omponent A nalysis
RMS	R oot M ean S quare
SAC-C/MMRS	A rgentinian satellite for S cientific A pplications- C / M ultispectral M edium R esolution S canner
SAR	S ynthetic A perture R adar
SAVI	S oil A ddjusted V egetation I ndex
SPOT 5	S ystem P our l' O bservation de la T erre 5
SSC	S ingle look S lant range C omplex
SWIR	S hort W ave I nfra R ed / M ittleres I nfra R ot
TM	T hematic M apper
UPS	U niversal P olar S tereographic
USGS	U nited S tates G eological S urvey
UTM	U niversal T ransverse M ercator
VMI	V egetation- M ission
ZKI	Z entrum für Satellitengestützte K risen I nformation

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Kurzfassung.....	II
Abstract	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Inhaltsverzeichnis.....	XI
1. Feuerproblematik im Mittelmeerraum und Gegenüberstellung von Möglichkeiten der Fernerkundung zur Brandflächendetektion	1 -
1.1 Feuerproblematik im Mittelmeerraum	3 -
1.1.1 Ursachen	4 -
1.1.2 Folgen	6 -
1.2 Fernerkundliche Erfassung von Waldbränden – Möglichkeiten, Services und Mechanismen.....	7 -
1.2.1 EFFIS <i>Fire Service</i>	9 -
1.2.2 Feuerservice des deutschen Fernerkundungsdatenzentrums	9 -
1.2.3 Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI).....	9 -
1.2.4 Internationale Charter „ <i>Space and Major Disasters</i> “	10 -
1.2.5 <i>Global Monitoring of Environment and Security</i> (GMES)	11 -
2. Gebietscharakteristik und Datengrundlage	12 -
2.1 Der Mittelmeerraum	12 -
2.1.1 Klima	12 -
2.1.2 Böden	13 -
2.1.3 Vegetation.....	14 -
2.2 Datengrundlage und Auswahl.....	15 -
2.2.1 Satellitendaten	15 -
2.2.2 Digitale Geländemodelle	18 -

2.2.3	CORINE Landbedeckungs-Daten	18 -
2.2.4	Referenzdaten	18 -
2.3	Untersuchungsgebiete	19 -
2.3.1	Griechenland – Region Grammatico	19 -
2.3.2	Spanien – La Palma	21 -
3.	Grundlagen der Fernerkundung zur Brandflächendetektion.....	23 -
3.1	Passive Aufnahmesysteme	25 -
3.1.1	Spektrale Eigenschaften von Brandflächen	26 -
3.1.2	Vergleich verschiedener Sensoren zur Brandflächendetektion	29 -
3.1.3	SPOT 5	33 -
3.1.4	Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden.....	34 -
3.2	Aktive Aufnahmesysteme	37 -
3.2.1	Funktionsweise	38 -
3.2.2	Vergleich von Radarsatelliten zur Brandflächendetektion	42 -
3.2.3	TerraSAR-X.....	45 -
3.2.4	Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden.....	46 -
4.	Datenvorverarbeitung.....	49 -
4.1	Vorverarbeitung der optischen Daten	49 -
4.1.1	Geometrische Korrektur	49 -
4.1.2	Atmosphärenkorrektur	51 -
4.2	Vorverarbeitung der Radar-Daten	57 -
4.2.1	<i>Speckle</i> -Reduktion	57 -
4.2.2	Radiometrische und geometrische Kalibrierung	60 -
5.	Entwicklung objekt-basierter Brandflächendetektionsmodelle auf Basis SPOT 5 und TerraSAR-X Satellitendaten	63 -
5.1	Entwicklung eines objekt-basierten Brandflächendetektionsmodells auf Basis optischer Satellitendaten mit mittlerem Infrarot.....	63 -
5.1.1	Unüberwachte Klassifikation	64 -

5.1.2	Reflexionseigenschaften.....	- 65 -
5.1.3	Trennbarkeitsanalyse	- 67 -
5.1.4	Auswahl der Indices	- 68 -
5.1.5	Algorithmus	- 71 -
5.1.6	Segmentierung	- 73 -
5.1.7	Klassifikation.....	- 75 -
5.1.7.1	Ausmaskieren der nicht verbrannten Gebiete.....	- 76 -
5.1.7.2	Ausmaskieren der Wolkenschatten, Küstenbereiche und dunklen Gesteine.....	- 77 -
5.1.7.3	Ausweisen der Brandfläche.....	- 77 -
5.1.8	Benutzerschnittstelle.....	- 85 -
5.1.9	Übertragbarkeitstest.....	- 86 -
5.2	Entwicklung eines objekt-basierten Brandflächendetektionsmodells für TerraSAR-X.....	- 87 -
5.2.1	Rückstreuverhalten	- 88 -
5.2.2	Algorithmus	- 90 -
5.2.3	Segmentierung	- 93 -
5.2.4	Klassifikation.....	- 95 -
5.2.5	Benutzerschnittstelle.....	- 97 -
5.2.6	Übertragbarkeitstest.....	- 98 -
5.3	Synergie von aktiven und passiven Systemen zur Brandflächendetektion.....	- 99 -
5.3.1	Algorithmus	- 99 -
5.3.2	Segmentierung	- 99 -
5.3.3	Klassifikation.....	- 101 -
5.3.4	Benutzerschnittstelle.....	- 103 -
6.	Genauigkeitsanalyse.....	- 105 -
6.1	Genauigkeit der entwickelten Verfahren	- 105 -
6.2	Genauigkeit der Übertragbarkeit der Verfahren.....	- 107 -
7.	Fazit und Ausblick zur Brandflächendetektion	- 109 -

Literaturverzeichnis.....	- 114 -
Anhang	- 130 -
Anhang 1: Optischer monotemporaler und multitemporaler Algorithmus zur Brandflächendetektion.....	- 130 -
Anhang 2: Benutzerschnittstelle des optischen monotemporalen und multitemporalen Algorithmus zur Brandflächendetektion.....	- 132 -
Anhang 3: Algorithmus des Radar-Verfahrens zur Brandflächendetektion	- 133 -
Anhang 4: Benutzerschnittstelle des Radar-Algorithmus zur Brandflächendetektion.....	- 134 -
Anhang 5: Algorithmus der Kombination des optischen- und Radar-Verfahrens zur Brandflächendetektion.....	- 135 -
Anhang 6: Benutzerschnittstelle des Kombinationsverfahrens zur Brandflächendetektion.....	- 140 -
Eidesstattliche Erklärung.....	- 141 -

1. Feuerproblematik im Mittelmeerraum und Gegenüberstellung von Möglichkeiten der Fernerkundung zur Brandflächendetektion

Waldbrände sind wahrscheinlich seit jeher ein natürlicher Bestandteil des mediterranen Ökosystems und tragen somit zur Evolution und Diversifizierung der Vegetation im Mittelmeerraum bei (Viegas et al. 2009). Durch das verstärkte Eingreifen des Menschen und die anthropogene Überprägung des Naturraumes stellen Feuer jedoch zunehmend eine Gefahr für Leben und Lebensraum dar, weshalb der Mensch versucht, natürliche Feuer gänzlich zu verbannen. Um Brände so schnell wie möglich erkennen zu können, wird das *Feuer-Monitoring* im mediterranen Raum deswegen stetig ausgebaut und verbessert. Hier zeigt sich der große Vorteil der Fernerkundung, die es ermöglicht, schnell große und schwer zugängliche Regionen zu erfassen. Mit dieser Thematik befasst sich das Kapitel 1 der vorliegenden Arbeit.

Dem Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) fällt dabei die Aufgabe zu, bei Katastrophen eine auf Satellitendaten gestützte Schnellkartierung der Ereignisse durchzuführen. Dabei gilt es, die Ersthelfer vor Ort so schnell wie möglich durch das zur Verfügung stellen von qualitativ hochwertigem Kartenmaterial zu unterstützen. Einige dieser Schnellkartierungen fanden im Jahr 2009 aufgrund von verheerenden Waldbränden in Griechenland, Spanien und Italien statt. Im Kontext dieser Naturkatastrophen ist die vorliegende Diplomarbeit entstanden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein bereits bestehendes *Fire-Tool* des ZKI zu erweitern. Das bestehende *Fire-Tool* wurde 2007 im Rahmen einer Diplomarbeit von Marcus Bindel anhand von Waldbränden nördlich von Athen entwickelt und auf weitere Gebiete in Portugal und Spanien übertragen. Der Algorithmus basiert auf monotemporalen, mittel- bis hochauflösenden Satellitendaten, die über ein Band im grünen, roten und nahen Infrarot des elektromagnetischen Spektrums verfügen. Das Verfahren ist objekt-basiert und wurde in der *Software eCognition Developer* generiert. Dieses *Fire-Tool* führte, angewandt auf die Waldbrände 2009 nördlich von Athen, jedoch zu einer hohen Fehlklassifikation von Wasserbereichen, Wolkenschatten und Freiflächen. Bei den Waldbränden 2009 in Spanien, La Palma, konnte das *Fire-Tool* aufgrund der besonderen spektralen Eigenschaften des Lavagesteins der Insel nur unbefriedigende Ergebnisse liefern. Im Zuge der Schnellkartierung des ZKI musste daher auf andere Auswerteverfahren zurückgegriffen werden. Zielsetzung dieser Arbeit ist es, das bestehende *Fire-Tool* zu modifizieren, oder ein neues *Fire-Tool* zu entwickeln, das die aufgezeigten Schwächen reduziert oder gänzlich nicht mehr beinhaltet. Dies soll durch ein objekt-basiertes, multitemporales Verfahren, das sowohl auf optischen als auch Radar-Daten beruht erreicht werden. Im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums werden Sensoren verwendet, die über ein Band im mittleren Infrarot verfügen, da sich dies nach einer ausführlichen Literaturrecherche als besonders geeignet zur Brandflächendetektion herausstellt. Das Verwenden multitemporaler Datensätze dient

ebenfalls zur Erhöhung des Klassifikationsergebnisses. Auch soll das bestehende *Fire-Tool* durch das Miteinbeziehen von Radar-Sensoren zur Brandflächendetektion erweitert werden. Da Radarstrahlen unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen Daten aufzeichnen, und Wolken durchdringen können, soll durch ein Kombinationsverfahren aus optischen und Radar-Daten die Brandflächendetektion verbessert werden. Zur Waldbranderfassung mittels Radar-Daten liegen jedoch nur wenig Referenz-Arbeiten vor. Deswegen gilt es festzustellen, ob, und inwieweit TerraSAR-X zur Brandflächendetektion verwendet und in das *Tool* integriert werden kann.

So werden im Laufe dieser Diplomarbeit drei verschiedene objektbasierte, semi-automatische und übertragbare Algorithmen zur Brandflächendetektion entwickelt. Der Erste umfasst optische Satellitendaten, die über ein Band im roten, nahen und mittleren Infrarot des elektromagnetischen Spektrums verfügen, und der sowohl mit monotemporalen, als auch mit multitemporalen Satellitendaten angewandt werden kann. Der zweite Algorithmus wird auf der Grundlage von multitemporalen TerraSAR-X Daten zur Brandflächendetektion entwickelt. Das dritte Verfahren kombiniert und vereinigt die beiden ersten Algorithmen, um eine Synergie beider Verfahren zu schaffen. Zur leichteren und schnelleren Benutzung wird für jeden der drei entwickelten Algorithmen eine Benutzeroberfläche generiert. Die Methodenentwicklung und Umsetzung der Benutzerschnittstelle wird in Kapitel 5 dieser Diplomarbeit ausführlich beschrieben.

Der Algorithmusentwicklung geht eine adäquate Vorverarbeitung sowohl der optischen als auch der Radar-Daten voraus, um ein bestmögliches Klassifikationsergebnis erzielen zu können (siehe Kapitel 4).

Die grundlegende Funktionsweise der Fernerkundung im Hinblick der Brandflächendetektion wird in Kapitel 3 dieser Arbeit näher erläutert. Ebenfalls gibt Kapitel 3 einen Überblick zum Stand der Forschung in der Feuererkennung mittels Fernerkundung und beschreibt die in dieser Arbeit verwendeten Satellitendaten näher.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die vorhandene Datengrundlage der Waldbrand-Schnellkartierungen des ZKI 2009, wobei die im Zuge dieser Arbeit getroffene Datenauswahl dargestellt wird. Ebenfalls befasst sich dieses Kapitel eingehend mit der Gebietscharakteristik des Mittelmeerraumes und der ausgewählten Regionen.

Die besondere Motivation dieser Diplomarbeit liegt darin, reelle Ereignisse untersuchen zu können, und durch einen Beitrag zur Optimierung der Brandflächendetektion die Mitarbeiter des ZKI und damit auch die betroffenen Menschen und Ersthelfer vor Ort in ihrer Arbeit unterstützen zu können.

1.1 Feuerproblematik im Mittelmeerraum

„The physical geography of the Mediterranean renders it an ideal landscape for burning.“ (Chuvieco et al. 2009: 11). Dieser Satz bringt deutlich zum Ausdruck, dass es sich im Mittelmeerraum um ein besonders anfälliges Gebiet für Waldbrände handelt. Auf die Ursachen dafür wird im nächsten Punkt genauer eingegangen. Jedoch muss ein Feuer nicht immer als negatives und zerstörerisches Element eines Ökosystems angesehen werden. Natürliche Feuer sind ein wichtiger Bestandteil zur Unterstützung der Produktivität und erhöhen die Biodiversität. Sie tragen maßgeblich zur Evolution mediterraner Vegetation bei und stellen einen natürlichen Selektionsprozess in der Entwicklung mediterraner Landschaften dar (Margaris et al. 1996). Punkt 1.1.2. geht näher darauf ein, warum Brände im mediterranen Raum heutzutage jedoch fast ausschließlich eine Bedrohung und keine Bereicherung für Natur und Mensch darstellen.

Die Veränderung der Waldbrandhäufigkeit im Mittelmeerraum wird in Abbildung 1-1 dargestellt. Statistiken dazu sind allerdings erst seit den späten 1970er Jahren verfügbar. Seitdem hat sich die Anzahl der Brände im mediterranen Raum verdoppelt (Justice et al. 2001). Hierbei ist interessant zu bemerken, dass die meisten Brände absichtlich durch Brandstiftung, Unachtsamkeit oder brennendes Weideland entstehen. Nur 5 % der Feuer sind natürlicher Ursache, wie zum Beispiel Blitzschlag (Pausas & Vallejo 2009). Abbildung 1-1 zeigt die Anzahl der Feuer in den fünf am meisten von Waldbränden betroffenen mediterranen Staaten Portugal, Spanien, Frankreich, Italien und Griechenland ab dem Jahr 1980. Nach einem starken Anstieg Anfang der 1990er Jahre ist seit 2006 ein Rückgang der Feuerhäufigkeit zu verzeichnen. Dies liegt vor allem an einem stetig besser ausgebauten Feuer-Monitoring und besseren Feuerbekämpfungsmaßnahmen (JRC 2009).

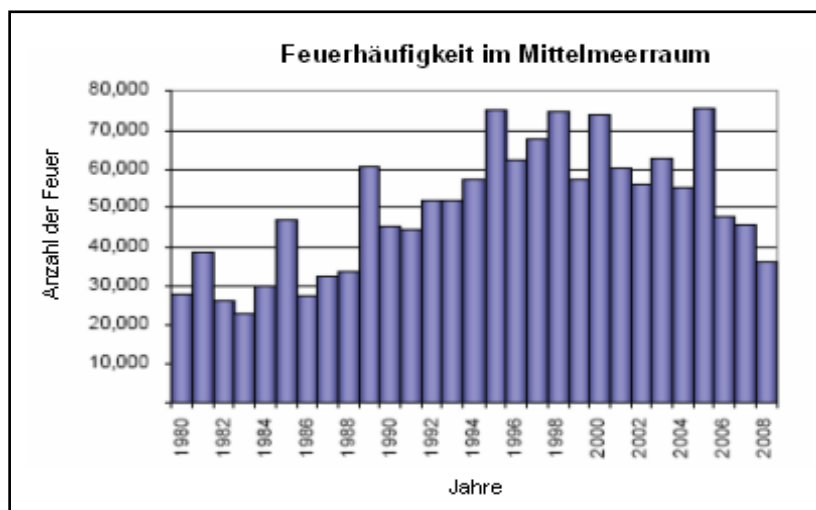


Abbildung 1-1: Feuerhäufigkeit im Mittelmeerraum, verändert nach JRC 2009

Auf die häufigsten Ursachen für Waldbrände wird im Folgenden näher eingegangen.

1.1.1 Ursachen

Wie bereits erwähnt, zählen Feuer seit jeher zu natürlichen Prozessen im Mittelmeerraum, was an den besonderen klimatischen Bedingungen (siehe Punkt 2.1.2) dieses Gebietes liegt. Durch das vermehrte Eingreifen des Menschen in das natürliche Ökosystem hat sich jedoch der durch Feuer entstehende Schaden stark erhöht.

Im Folgenden werden sowohl die natürlichen, als auch auf die anthropogen bedingten Feuerursachen beschrieben.

Klima

Der mediterrane Raum ist aufgrund seines Klimas stark feueranfällig. Der Wechsel zwischen feuchter und trockener Jahreszeit in Kombination mit Dürren bedingt, dass immer Material zum Verbrennen vorhanden ist (Pyne 2009). Das mediterrane Klima zeichnet sich durch eine lange Sommertrockenheit mit hohen Temperaturen und geringer Luftfeuchtigkeit aus (siehe Punkt 2.1.2). Das Fehlen von Niederschlag führt bei der Vegetation vermehrt zu Wasserstress, weshalb das Waldbrandrisiko zu Ende des Sommers besonders hoch ist. Zusätzlich können starke Winde wie der Mistral, der Bora oder der Sirocco kleine Feuer zu sehr großen Bränden anfachen (Pyne 2009).

Klimawandel

Erschwerend kommt hier der Klimawandel hinzu. Laut dem aktuellsten IPCC Bericht von 2007 geht man von einer Zunahme der mittleren Temperaturen und einer Abnahme der sommerlichen Regenfälle im mediterranen Raum aus. Dies führt zu einer Zunahme des Wasserdefizits, was zu einer erhöhten Austrocknung des Bodens und zu einem vermehrten Auftreten von Wasserstress bei den Pflanzen führt. Ebenfalls werden extreme Wetterereignisse, wie lange Hitzeperioden mit geringer Luftfeuchtigkeit und starke Winde in Zukunft zunehmen (IPCC 2007). Ein Temperaturanstieg kombiniert mit weniger Niederschlag bedeutet sowohl eine Verlängerung der Feuersaison, als auch eine Ausdehnung des gefährdeten Gebietes nach Norden. Der phänologische Zustand der Pflanzen hängt von der ihnen zur Verfügung stehenden Bodenfeuchte ab, die von Niederschlag oder Flüssen bedingt ist. Fällt aufgrund des Klimawandels weniger Regen und Schnee, und setzt die Schneeschmelze früher ein, fehlt wichtiges Bodenwasser, was das Waldbrandrisiko erhöht (Chuvieco 2009).

Landnutzungswandel

Wie bereits erwähnt, ist das Klima nur ein Faktor für die hohe Feuergefahr im mediterranen Raum. Anthropogene Veränderungen tragen ebenfalls zum Waldbrandrisiko bei. Einen Anteil hierbei trägt der Landnutzungswandel. Seit vielen Jahrhunderten herrscht im Mittelmeerraum ein starker Bevölkerungsdruck. Aufgrund dessen wurden großflächig Gebiete abgeholzt und schwer zugängliche Bereiche bewirtschaftet (Leone et al. 2009). Das Feuerrisiko wird außerdem durch vermehrtes Anbauen von Monokulturen, die ein leichteres Ausbreiten von

Bränden ermöglichen, verstärkt (Pausas & Vallejo 1999). In dieser stark anthropogen geprägten Landschaft findet seit den letzten Jahrzehnten ein Niedergang der Landwirtschaft statt. Die damit verbundene Landflucht führt zu einer Abwanderung der ländlichen Bevölkerung in die Städte und Küstenregionen. Durch diese sozioökonomische Veränderung liegt viel Land brach und die traditionelle Bewirtschaftung ist gestört (Leone et al. 2009). Dies führt zu einer größeren Ansammlung von Brennmaterial, was wiederum die Stärke und Intensität der Brände vergrößert. Vor diesem Hintergrund kann auch der traditionelle Einsatz von Feuer zur Pflege von Weide- und Ackerflächen, wie Pflanzenschädlingsbekämpfung oder Beseitigung von Ernterückständen, verheerende Folgen haben, wenn die Flammen auf ungenutzte Grundstücke übergreifen und sich zu einem unkontrollierten Flächenbrand entwickeln (Leone et al. 2009). Ebenfalls nimmt durch die konsequente Verhinderung von natürlichen und kleinen Feuern das brennbare Material in den Wäldern zu. Entsteht ein Brand, fällt dieser stark und zerstörerisch aus (Pausas & Vallejo 2009). Weite Teile der Vegetation im Mittelmeerraum unterliegen bis heute einer tief greifenden Umwandlung. Terrassenbau, große Maschinen für die Landwirtschaft, Abholzung und Urbanisation haben dazu geführt, dass die ursprünglich vorherrschende Vegetation durch Sekundärwälder ersetzt und die wenigen verbliebenen Altwälder stark fragmentiert und aufgelichtet sind. Dies führt außerdem dazu, dass sich eine große Menge an trockenem Holz ansammeln kann (Bolle et al. 2006). Ebenfalls ist eine Prioritätenänderung in der Forstwirtschaft und Desinteresse am Wald als Ressource zu beobachten. Dies resultiert in einem Anstieg von unkontrollierten Büschen (Unterholz) und Biomasse, was das Feuerrisiko ansteigen lässt (Leone et al. 2009).

Konträr zum Abwanderungstrend steht eine Entwicklung von vermehrtem Erbauen von Wochenendhäusern, die meist mitten im Wald stehen. Dies erhöht das Schadenspotential und die Gefahr für Menschen im Falle eines Waldbrandes stark. Hinzu kommen eine zunehmende Urbanisierung, und ein Ausbau der Infrastruktur aufgrund touristischer Entwicklung entlang der Küsten. Touristen wissen oft nicht um das große Waldbrandrisiko und können so durch Unachtsamkeit (zum Beispiel Rauchen oder offenes Feuer) Waldbrände verursachen (Viegas et al. 2009).

Brandstiftung

Ein Großteil der Waldbrände wird vorsätzlich gelegt, wobei Immobilienspekulation und Baulandgewinnung, aber auch Jagd- und Weidewirtschaft ein Motiv darstellen (WWF 2008). Die Brandstiftung greift dadurch in das natürliche Feuer-Regime ein und erhöht die schlechten Konsequenzen von Feuer auf die Gesellschaft und die Umwelt (Leone et al. 2009). Durch den Mangel an Erwerbsmöglichkeiten im ländlichen Raum gewinnen zudem befristete Arbeitsplätze bei der Brandbekämpfung und bei der Wiederaufforstung der Brandflächen an Bedeutung. Immer wieder legen daher Feuerwehrmänner und Waldarbeiter Feuer, um sich selbst Arbeit zu verschaffen (WWF 2008).

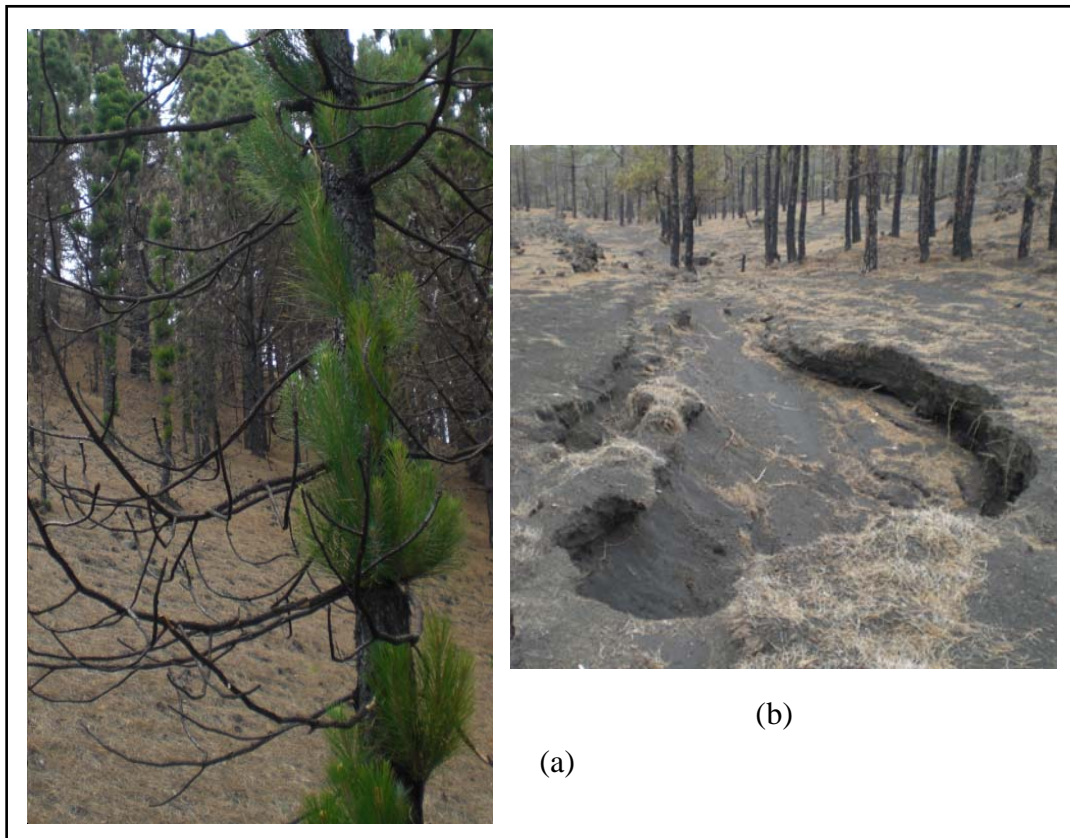
1.1.2 Folgen

Die Folgen von Waldbränden kann man grob in ökologische und ökonomische Folgen trennen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Ökologische Folgen

Viele Baumarten im Mittelmeerraum haben sich dem Auftreten von Waldbränden angepasst. Als Beispiel sei hier die Korkeiche und kanarische Kiefer genannt, die durch ihre dicke, isolierende Rinde über gute Regenerationsprozesse verfügt (Chuvieco 2009). Abbildung 1-2 (a) zeigt die verbrannte Vegetation La Palmas acht Monate nach dem Waldbrand. Im Vordergrund ist eine bis auf den Stamm und größere Äste abgebrannte kanarische Kiefer zu sehen, aus deren verkohltem Stamm jedoch bereits neue Triebe hervor sprießen. Gleiches ist bei den Bäumen im Hintergrund zu beobachten. Durch häufige, sich wiederholende Waldbrände starker Intensität versagt dieser Schutz jedoch, was zu einer Degradation der Wälder zu Gestrüpp, Zwergstrauch-Gebüsch und Krautgewächsen führt (Bolle et al. 2006).

Fehlt die Vegetationsbedeckung, führt dies zu mehr Erosion durch Wind und Wasser. Ebenfalls können vermehrt Überschwemmungen und Hangrutschungen auftreten, was zu einem Verlust von Leben und Besitz führen kann (Pausas & Vallejo 1999, Justice & Koronzti 2001). Abbildung 1-2 (b) zeigt eine große Erosionsfläche in der Waldbrandfläche La Palmas, aufgenommen ebenfalls acht Monate nach dem Feuer.



**Abbildung 1-2: Vegetation und Erosion im Bereich der Brandfläche 2009 in La Palma,
Fotoaufnahme Hendrik Zwenzner, Mai 2010**

Auch wird die physio-chemische Zusammensetzung des Bodens durch die hohen Temperaturen während des Brandes und die Anreicherung mit Asche beeinträchtigt. Damit verändert sich das Bodenverhalten zur Wasserspeicherung und die Nährstoffverfügbarkeit. Dies bedingt eine Veränderung der vorherrschenden Vegetation, Verlust von Biomasse und einen Wandel des Landschaftsbildes (Justice & Koronzi 2001). Diese Degradation gefährdet auch das Überleben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten. Je nach phänologischem Stadium der Pflanzen ist eine Regeneration schnell oder auch gar nicht mehr möglich, was ein Fortpflanzen der Vegetation verhindert (Pausas & Vallejo 1999).

Ebenfalls trägt ein Waldbrand zu einem erhöhten CO_2 Ausstoß und damit zur Klimaerwärmung bei (Chuvieco 2009).

Breiten sich Waldbrände aufgrund des Klimawandels vom mediterranen Raum weiter nach Norden aus, werden Ökosysteme, die nicht an ein Feuerregime gewöhnt sind, stark in ihrer biologischen Vielfalt, der Artenzusammensetzung, der Struktur und der Regeneration vorherrschender Vegetationsbestände beeinträchtigt (FAO 2007).

Ökonomischen Folgen

Neben den ökologischen Auswirkungen eines Brandes sollen hier auch die wirtschaftlichen und sozialen Folgen genannt werden. Durch das Feuer sind Menschenleben in Gefahr, vor allem das der Einsatzkräfte vor Ort. Ebenfalls wird durch das Feuer persönlicher Besitz vernichtet, oder falls Fabriken oder Produktionsanlagen abbrennen, gehen neben Gebäuden auch Arbeitsplätze verloren. Werden Infrastruktureinrichtungen beschädigt, kommen hohe Kosten auf die einzelnen Länder zu. Die Brandvorbeugung, Bekämpfung, und Wiederaufforstung führen zu hohen Kosten. Ebenfalls kann durch das Fernbleiben von Touristen während der Waldbrände ein starker Einbruch in den Einnahmen aus dem Tourismus entstehen (FAO 2007).

1.2 Fernerkundliche Erfassung von Waldbränden – Möglichkeiten, Services und Mechanismen

In diesem Punkt werden die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Brandflächendetektion und verschiedene Feuer-Services kurz dargestellt. Zum besseren Verständnis der Einbettung dieser Diplomarbeit in die ZKI Katastrophenkartierung werden die Mechanismen, Funktionsweisen und Services der Waldbranderfassung näher beschrieben.

Nach Koutsias & Karteris 1999 gibt es drei verschiedene Möglichkeiten, um Waldbrände zu erfassen. Die erste Methode auf mikroskaliger Ebene, basiert auf Feldmessungen und Beobachtungen vor Ort. Dies ist eine sehr zeitintensive und kostspielige, jedoch ziemlich genaue Methode. Die Möglichkeit, dieses Verfahren in einen operationellen Dienst zur Feuerdetektion zu integrieren ist jedoch begrenzt und aus Kostengründen unwahrscheinlich.

Die zweite Methode umfasst flugzeuggestützte Aufnahmesysteme, die kostengünstiger sind und größere geographische Gebiete erfassen können als Feldbegehungen.

Die dritte Methode benutzt satellitengestützte Fernerkundungsdaten. Diese Methode verfügt über den Vorteil, dass sie kostengünstig ist und systematisch große, auch unzugängliche Bereiche abdecken kann. Ebenfalls von Vorteil ist die wiederkehrende Aufnahmemöglichkeit, wodurch man den Verlauf, die Ausbreitung, und den Trend des Waldbrandes feststellen kann (Koutsias & Karteris 1999). Darüberhinaus besitzt die digitale Aufnahme den Vorteil von Schnelligkeit und Objektivität. Auch kann sie Daten von Bereichen des elektromagnetischen Spektrums (Infrarot) ermitteln, die speziell über Vegetation und Böden sehr nützliche Informationen garantieren (Norton et al. 2009). Um einen ausgebrochenen Brand bekämpfen, und Hilfe vor Ort leisten zu können, benötigt man zusätzliche Informationen über menschliche Siedlungen, Wasserstellen und das Straßennetz. Ebenfalls sind digitale Geländemodelle, um das Relief darstellen, und somit mögliche Wege des Feuers extrahieren zu können, sehr von Nutzen (Dull & Lee 2001). Diese Informationen können aus Fernerkundungsdaten extrahiert werden, sofern sie nicht bereits in digitaler Form vorliegen.

Wie alle Verfahren ist auch die Brandflächendetektion mit Hilfe der Fernerkundung nicht fehlerfrei. So kann es bei verschiedenen Auswertemethoden unterschiedlich häufig zu Fehlklassifikationen kommen, vor allem bei anderen Bedeckungsarten wie Wasser, Land-Wasser-Übergangsbereichen oder beschatteten Gebieten (Pereira et al. 1999, Martín et al. 1999). Die Vorteile der Fernerkundung, vor allem im Hinblick auf die Implementierung in den operationellen Dienst, überwiegen jedoch deutlich.

Generell kann die Fernerkundung drei verschiedene Aufgaben des Feuer-Monitorings übernehmen. Erstens eine Analyse zur Feueranfälligkeit eines Gebietes vor einem Waldbrand. Zweitens das Erkennen und Detektieren von Waldbränden. Und drittens Studien zur Vegetationserneuerung nach einem Waldbrand (Martín et al. 1999). Diese Diplomarbeit befasst sich ausschließlich mit dem zweiten Punkt, der Detektion von Waldbränden. Dabei soll die Fernerkundung nach Barducci et al. 2002 folgende Aufgaben erfüllen: Zum Einen eine Lokalisation und die genaue geographische Ausdehnung der Feuerfront. Zum Anderen eine Abschätzung der Feuer-Intensität. Als dritten Punkt führt Barducci et al. das Erkennen von nicht verbrannter Vegetation innerhalb einer Brandfläche, und von verbrannten Gebieten außerhalb der Hauptbrandfläche an. Als letzte Aufgabe nennt er das Erstellen einer kartographischen Karte für Hilfs- und Restaurationsarbeiten. Diese Diplomarbeit hat sich zum Ziel gesetzt, die Durchführbarkeit der ersten drei aufgeführten Punkte sowohl mit optischen-, als auch mit Radar-Daten zu testen. Auf das Erstellen einer geographischen Karte wird hingegen nicht näher eingegangen.

1.2.1 EFFIS *Fire Service*

Im Jahr 1997 setzte die Europäische Kommission eine Forschergruppe ein, die speziell an der Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Evaluation des Waldbrandrisikos und an der Abschätzung der verbrannten Fläche in der europäischen Union arbeiten sollte (JRC 2009). Diese Gruppe arbeitet bis jetzt als ein Teil der europäischen Kommission im Joint Research Centre (JRC), was schließlich zur Entwicklung des *European Forest Fire Information System* (EFFIS) geführt hat. Seit 2000 ist EFFIS im operationellen Dienst verfügbar. Dabei werden die Daten, die die einzelnen Länder erheben, verwaltet. Ebenfalls entstand eine *web-mapping* Oberfläche, die es Nutzern erlaubt, europaweit Informationen über gerade ausgebrochene oder vergangene Feuer zu erhalten (JRC 2009). Seit 2003 wird der MODIS Sensor zur Brandflächendetektion verwendet, womit Feuer von einer Mindestausdehnung von 40 Hektar erfasst werden können (San-Miguel-Ayanz et al. 2009). Ebenfalls erstellt EFFIS eine europaweite Vorhersage des Feuerrisikos anhand von meteorologischen Daten. Das Ausmaß der Brände wird erfasst und mit Hilfe der CORINE-Landbedeckungsklassen kann festgestellt werden, welche Bedeckungsarten verbrannt sind. Als zusätzliche Information können administrative Grenzen und ein Geländemodell zugeschaltet werden (JRC 2009).

Die Brandfläche des EFFIS-*Fire Service* wurde im Zuge dieser Diplomarbeit verwendet um sich einen ersten Überblick über die Waldbrände zu verschaffen (www.EFFIS.JRC.EC.europa.eu).

1.2.2 Feuerservice des deutschen Fernerkundungsdatenzentrums

Das deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt bietet einen operationellen Service zur Waldbranddetektion mit Hilfe des MODIS Sensors (*hot spots*). Seit 2006 können Nutzer Informationen über aktuelle Feuer in Europa über die Internetseite des DLR erhalten und Daten herunterladen. Der hierbei verwendete Algorithmus basiert auf einem an der Universität von Maryland entwickeltem Ansatz, liefert jedoch, im Gegensatz zum EFFIS *Fire-Service*, keine räumliche Abgrenzung der Brandfläche.

1.2.3 Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI)

Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) hat vor dem Hintergrund einer ständig steigenden Anzahl von Naturkatastrophen das Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI), als Service des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) eingerichtet. Im Auftrag des DLR koordiniert das ZKI Aktivitäten der internationalen Charter *Space and Major Disasters* und ist somit für die schnelle Beschaffung, Aufbereitung und Auswertung von Satellitenbilddaten bei Natur- und Umweltkatastrophen, für humanitäre Hilfsaktivitäten und für die zivile Sicherheit mit der Bereitstellung eines Projektmanagers im Rahmen dieser Charter zuständig (www.zki.dlr.de). Die Auswertungen werden dabei nach den spezifischen Bedürfnissen für nationale und internationale politische Bedarfsträger oder Hilfsorganisationen durchgeführt. Dabei ist das ZKI mit verschiedenen behördlichen Partnern

auf EU-, Bundes- und Landesebene, sowie Krisenreaktionszentren und dem Zivil- und Umweltschutz, Nicht-Regierungsorganisationen wie zum Beispiel humanitären Hilfsorganisationen, sowie Satellitenbetreibern und Weltraumorganisationen stark vernetzt (Gähler & Voigt 2008). Neben der reinen Krisenreaktion und Krisenbeurteilung steht auch die Ableitung von Geoinformationen für den Wiederaufbau und die Krisenprävention im Fokus der Arbeiten und Analysen des ZKI (www.zki.dlr.de). Um den nicht einfach zu interpretierenden Inhalt eines Satellitenbildes in lesbare und verständliche Kriseninformation zu wandeln, werden Karten zur Lage- und Schadensdarstellung erstellt. Nach einer Katastrophe besteht bei Lagezentren, bei Hilfsorganisationen und Rettungskräften ein hoher Bedarf an schneller, zuverlässiger und raumbezogener Information. Aufgrund der Dringlichkeit dieser Information, ist ein Hauptpunkt der Kriseninformation durch das ZKI die „Schnellkartierung“ (*rapid mapping*), die eine nahe Echtzeitfähigkeit der Ergebnisproduktion zum Ziel hat (Bamler et al. 2006).

Diese Diplomarbeit ist im Rahmen von zwei Charter-*Calls* aufgrund von verheerenden Waldbränden in Griechenland und La Palma im Sommer 2009 entstanden. Hierzu fertigte das ZKI im Rahmen des *rapid mapping* zahlreiche Karten für die Ersthelfer vor Ort an.

1.2.4 Internationale Charter „*Space and Major Disasters*“

Die internationale Charter *Space and Major Disasters* wurde im Jahr 2000 ins Leben gerufen. Bis 2005 wurde sie hauptsächlich für Naturkatastrophen, aber auch für technische Unfälle, die Staaten der ganzen Welt betroffen haben, 72 mal ausgelöst (Mahmood et al. 2005). Heute gehören dieser Charter zehn Raumfahrtbehörden und Satellitenbetreiber an. Dazu zählen das European Space Agency (ESA), das Centre national d'études spatiales (CNES), das Canadian Space Agency (CSA), das Indian Space Research Organisation (ISRO), das National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Argentina's Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), das Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), das United States Geological Survey (USGS), DMC International Imaging (DMC), und das China National Space Administration (CNSA) (www.disasterscharter.org). Die Einzigen, die diese Charter auslösen dürfen, sind autorisierte Nutzer der Teilnehmerländer, wie zum Beispiel Zivilschutz-Hilfs-, Verteidigungs-, oder Sicherheitsorganisationen. Ist die internationale Charter *Space and Major Disasters* ausgelöst worden, werden die am schnellsten und am besten passenden Satelliten programmiert und die Raumfahrtagenturen benachrichtigt. Da für jede Katastrophe unterschiedliche Satelliten und Raumfahrtbehörden in Frage kommen, werden immer verschiedene Agenturen benachrichtigt. Es wird versucht, sowohl Archivdaten, als auch neu aufgenommene Daten den Instituten so schnell wie möglich zur Verfügung zu stellen und untereinander auszutauschen (Kemper et al. 2010).

1.2.5 Global Monitoring of Environment and Security (GMES)

GMES ist eine europäische Initiative zwischen der Europäischen Kommission und der ESA für wissensbasierte Technologien zum besseren Umweltmanagement und in Sicherheitsangelegenheiten. 1998 gab es bereits erste Treffen zum GMES-Konzept, und seit 2000 existiert die Partnerschaft aus dem Rat der EU sowie der ESA (Kemper et al. 2010). Neben der Charter nimmt die GMES-Initiative eine wichtige Funktion für die Bereitstellung satellitengestützter Kriseninformation ein. Damit übernimmt die EU Verantwortung für neue internationale Herausforderungen wie Krisenmanagement, Friedenssicherung, Humanitäre Operationen und Entwicklungshilfe. GMES stellt die Verfügbarkeit von Umwelt- und Sicherheitsinformationen hoher Qualität auf einer ununterbrochenen und operationellen Basis durch Erdbeobachtung aus dem Weltraum in Zusammenarbeit mit anderen Informationstechnologien sicher. GMES findet und entwickelt Elemente, die benötigt werden, um nachhaltige, kosteneffiziente und operationelle Verteilungsketten zu generieren (Costa et al. 2002). So wird zum Beispiel der GMES *Emergency Response Service* als ein operationeller Kerndienst aufgebaut, über den Brandflächen zum Beispiel durch das ZKI ausgewertet werden.

In Kapitel 1 wurde ein kurzer Überblick über die Motivation und den Inhalt dieser Diplomarbeit gegeben. Ebenfalls wurde die Feuerproblematik im Mittelmeerraum mit ihren Ursachen und Folgen näher erläutert, woraus sich die Wichtigkeit der Fernerkundung beim Feuer-Monitoring ergibt. Auch sind verschiedene Feuer-Sevices in Europa und die Einbettung dieser Arbeit in das Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation dargestellt worden. Das nächste Kapitel befasst sich mit der Gebietscharakteristik des Mittelmeerraumes, der vorhandenen Datengrundlage und der Datenauswahl.

2. Gebietscharakteristik und Datengrundlage

Wie bereits erwähnt, entstand diese Diplomarbeit im Kontext von drei Charter-*Calls* zu verheerenden Waldbränden in Griechenland, Italien und Spanien im Jahr 2009. In Kapitel 2 wird daher näher auf den Mittelmeerraum eingegangen. Dabei werden die geographische Lage, das vorherrschende Klima, die Böden und die Vegetation beschrieben. Ebenfalls wird die Datengrundlage der drei Katastrophenkartierungen dargestellt. Es wird erklärt, welche Satellitenbildszenen zur Algorithmusentwicklung ausgewählt werden, und die gewählten Gebiete werden näher beschrieben. Auch werden alle zusätzlich für diese Diplomarbeit benötigten Daten kurz aufgeführt.

2.1 Der Mittelmeerraum

„Eine allumfassende geographische, geologische, klimatische, ökologische oder biogeographische Definition, die sämtliche Aspekte der mediterranen Vielfalt berücksichtigen und den Mittelmeerraum eindeutig abgrenzen würde, gibt es nicht.“ (Hofrichter et al. 2001: 102). Eine grobe Abgrenzung der mediterranen Region bilden jedoch die alpidischen Gebirgszüge um das Becken, und seine Lage zwischen dem 30. und 40. nördlichen Breitengrad (Hofrichter et al. 2001). Ebenfalls wird oft die Wachstumsgrenze des wertvollsten Frucht- und Nutzbaumes, des Ölbaumes, als Abgrenzungskriterium des Mittelmeerraumes verwendet (Rother 1993, Hofrichter et al. 2001). Hierbei werden jedoch die Höhenregionen des Mittelmeerraumes weitgehend ausgespart.

Das Festland des Mittelmeerraumes ist durch seine Lage im alpidischen Faltensystem in viele kleine Landschaftszellen zersplittert. Das ausgeprägte Relief erzeugt eine wechselvolle Szenerie, in der großflächige Lebensräume die Ausnahme sind. Dies führt zu einer engen Kammerung und Individualisierung ihrer Oberfläche (Rother 1993). Hier zeigt sich ein Vorteil der Fernerkundung, da auch schwer zugängliche Landschaftsbereiche beobachtet werden können.

Der mediterrane Raum ist charakterisiert durch eine hohe Diversität und Heterogenität der Vegetations- und Landschaftsstruktur. Im Folgenden wird dargestellt welches Klima, welche Böden und welche Vegetation ihn auszeichnen.

2.1.1 Klima

Der Mittelmeerraum unterliegt zwei verschiedenen Klimasystemen. Durch die Verschiebung der innertropischen Konvergenzzone (ITC) an den nördlichen Wendekreis im Nordsommer, dehnen sich die Subtropen über den Mittelmeerraum hin aus, und das Mittelmeer unterliegt dem subtropischen Hadley Zirkulationssystem (Lauer & Bendix 2006). Im Nordwinter hingegen wandert die ITC an den südlichen Wendekreis und erreicht somit den

weitestmöglichen Abstand zur Nordhälfte. Aufgrund dessen verschieben sich auch die Subtropen nach Süden, und der Mittelmeerraum gerät unter den Einfluss der außertropischen Westwindzirkulation (Hofrichter et al. 2001). Durch die unmittelbare Nachbarschaft des Mittelmeeres bleibt der feuchte Winter mild (Rother 1993). Somit zählt der europäische Mittelmeerraum zu den winterregengeprägten Subtropen, was zwei ökologische Stressfaktoren aufweist (Lauer & Bendix 2006). Zum Einen eine exzessive, sommerliche Trockenzeit, die genau in die Vegetationsperiode fällt und zum Anderen, dass diese Trockenzeit eine ausgeprägte Niederschlagsvariabilität besitzt. Letztere verursacht extremen Wasserstress bis hin zu Dürreschäden. Die maximalen Niederschläge fallen im Herbst und im Frühjahr (Lauer & Bendix 2006).

2.1.2 Böden

Aufgrund der langen Trockenheit während der Sommermonate wird die Pedogenese für einen relativ langen Zeitraum unterbrochen, sodass sich die Bodenbildung auf die feuchten Wintermonate beschränkt, in denen ausreichend Feuchtigkeit zur chemischen Verwitterung vorhanden ist (Rohter 1993). Das bereits angesprochene ausgeprägte Relief bringt es mit sich, dass häufig sehr flachgründige oder skelettartige Böden mit Gesteinstrümmern, also Rohböden ohne ausgeprägten Humushorizont, vorhanden sind. Somit verhindern die horizontale und vertikale Kammerung des Reliefs und der rasche Gesteinswechsel ein großflächiges Vorkommen eines Bodentypes (Rohter 1993). Im Mittelmeerraum kommen hauptsächlich braune (*Terra fusca*) und rote (*Terra rossa*) mediterrane Böden, sowie entsprechende Übergangsböden, die rotbraunen Böden (*Chromic Luvisol*) vor. Alle diese Böden sind relativ nährstoffarm, weitgehend entkalkt und reagieren dementsprechend schwach sauer (Rohter 1993). In Anpassung an die Reliefverhältnisse kommen verschiedene azonale Böden vor. So wechseln sich mehrere Varianten unergiebigere Böden des Steilreliefs (*Lithosole*) mit ertragreichen Böden in Tälern und Senken (*Regosole*) ab. Ab einem gewissen Alter können sich auf vulkanitischem Substrat mineralreiche, fruchtbare Böden (*Andosole*) ausbilden (Rohter 1993).

Gefährdet werden die meist nur gering fruchtbaren Böden des mediterranen Raumes durch eine intensive Bodennutzung seit der Antike, eine hochgradige Entwaldung und fehlenden Bewuchs des Ackerlandes über große Teile des Jahres (Rohter 1993). Aufgrund der sommerlichen Trockenheit und der häufigen Starkregen in der feuchten Jahreszeit (siehe Punkt 2.1.2) sind die Böden in hohem Maße erosionsgefährdet. Dazu trägt ebenfalls die Bodenerosion durch Wind bei.

Somit wirkt sich die Vegetationszerstörung durch Feuer verheerend aus und führt zu vermehrter Erosion, was in besonders ungünstigen Umständen zur völligen Abtragung des Bodens führen kann (siehe Abbildung 1-2 (b)) (Rother 1993).

2.1.3 Vegetation

Der Mittelmeerraum ist hinsichtlich seiner Artenvielfalt eine der wichtigsten Regionen der Erde, da er als Übergangszone zwischen drei Kontinenten Arten aus Europa, Afrika und Asien beherbergt. So finden sich hier beispielsweise 10% aller blühenden Pflanzen, obwohl der Mittelmeerraum nur 1,6% der Erdoberfläche einnimmt (WWF 2008).

Wo der Boden es zulässt, herrschen hartlaubige oder mikrophylle Holzgewächse vor (Reisigl 2001). Für den heutigen Zustand der Vegetation im Mittelmeerraum ist vor allem der Mensch verantwortlich, weshalb sich der für den Mittelmeerraum so bezeichnende Hartlaubwald nur an wenigen Stellen erhalten hat und durch Kulturland ersetzt worden ist (Reisigl 2001). Die am meisten verbreiteten Hartlaubgewächse setzen sich aus immergrünen Bäumen, Sträuchern, Halb- und Zwergsträuchern zusammen. Generell bestimmt sich die Vegetation aus mannigfacher kleinräumiger Differenzierung des Pflanzenkleides, was auf den Wettbewerb innerhalb der Arten zurückgeht. Dabei ist es gleichgültig ob das Klima oder der Boden die unterschiedliche Feuchtebilanz verursachen. Die natürlichen Hartlaubwälder bestehen aus immergrünen Eichen (Rother 1993). Ursprünglich handelte es sich dabei um geschlossene Wälder mit einer 15 – 18 Meter hohen Baumschicht, einer artenreichen immergrünen Strauchschicht (3 – 5 Meter) und einer Krautschicht immer- und sommergrüner Gewächse (0,5 Meter). Die Baumschicht wird dabei von wenigen Leitarten, die je nach Region im Mittelmeerraum unterschiedlich vorkommen, gebildet. Dazu zählen zum Beispiel die Stein- oder Grüneiche (*Quercus ilex*), die Korkeiche (*Quercus suber*), Kermeseiche (*Quercus coccifera*), wilder Ölbaum (*Olea oleaster*), Johannisbrotbaum (*Ceratonia siliqua*), Aleppokiefer (*pinus halepensis*), Seestrandkiefer (*pinus maritima*), Zypresse (*Cupressus sempervirens*) und verschiedene Zedern (*Cedrus atlantica*, *Cedrus libani*) (Reisigl 2001, Rother 1993).

An vielen Stellen werden die lichten Hartlaubwälder von Hartlaubgebüsch abgelöst. Diese zwei bis vier Meter hohen, dichten Strauch- und Zwergstrauchgesellschaften kommen auch unabhängig von Wäldern vor, und werden als Macchie bezeichnet. Als Leitarten treten hierbei die Baumheide (*Erica arborea*), der Erdbeerbaum (*Arbus unedo*), die Montpellier-Zistrose (*Cistus monspeliensis*), der Lorbeer (*Laurus nobilis*), der Mastixstrauch (*Pistacia lentiscus*), die Steinlinde (*Phillyrea media*), der immergrüne Kreuzdorn (*Rhamnus alaternus*), die echte Myrte (*Myrtus communis*), die Stechwinde (*Smilax aspera*) und der Gemeine Mäusedorn (*Ruscus aculeatus*) auf (Reisigl 2001, Rother 1993).

Die nächste, weit verbreitete Pflanzengesellschaft stellt die Zwergstrauchformation, die Garrigue, dar. Im Unterschied zur Macchie werden die Gariden nur kniehoch, stellen eine relativ offene Pflanzengesellschaft (Heide) dar und weisen einen reichhaltigeren Artenbestand mit starkem Wechsel der Leitarten auf. Hierbei treten meist krüppelwüchsige, immergrüne Eichen, verschiedene Zistrosen, Hart- und Weichlaubgewächse, Kräuter (zum Beispiel Minze, Thymian, Salbei, Lavendel, Rosmarin) und Zwiebelgewächse (wie Iris, Orchidee, Wildtulpe)

als Leitarten auf (Reisigl 2001, Rother 1993). Die bereits unter Punkt 2.1.2 aufgezeigte azonale Bodenbedeckung führt ebenfalls zu azonalen Vegetationsformen wie zum Beispiel Auwäldern oder Sumpfvegetation. Hierzu zählt auch die Salzvegetation der Sandstrände und Dünen, Felsküsten und Marschen (Reisigl 2001, Rother 1993).

Da auf vergleichbaren Standorten sowohl Wald-, Strauch- und Zwergstrauchformationen nebeneinander vorkommen, sind die Strauch- und Zwergstrauchformationen als anthropogene Ersatzgesellschaften des Hartlaubwaldes aufzufassen. Die Sekundärformationen der Macchien und Gariden sind durch holzwirtschaftliche Nutzung, Beweidung oder Brände entstanden (Reisigl 2001).

2.2 Datengrundlage und Auswahl

Die internationale Charter *Space and Major Disasters* wurde im Sommer 2009 für Waldbrände in Griechenland, Spanien und Italien ausgelöst. Für diese drei Brände liegen dem ZKI zahlreiche Satellitenbilder vor. Welche Auswahl der Satellitenbildszenen im Zuge dieser Diplomarbeit getroffen wird, wird in Punkt 2.2.1 näher erörtert.

Zur Vorprozessierung der Satellitenbildszenen sind digitale Geländemodelle notwendig. Um eine Bestandsaufnahme der verbrannten Gebiete durchführen zu können, werden die CORINE Landbedeckungsdaten verwendet. Um die entwickelte Methode einer Genauigkeitsanalyse unterziehen zu können, werden EFFIS- und ZKI-Referenzflächen verwendet. Auf diese Datengrundlagen wird in den Punkten 2.2.2. – 2.2.4. näher eingegangen.

2.2.1 Satellitendaten

Im Rahmen der bereits unter Punkt 1.2.4 erörterten internationalen Charter *Space and Major Disasters* wurden die unter Tabelle 2-1 dargestellten Satellitendaten zum Zeitpunkt der jeweiligen Waldbrände in Griechenland (Region Grammatiko), in Spanien (La Palma) und in Italien (Sardinien) aufgenommen. Tabelle 1-1 führt den Namen des Satelliten, seine räumliche Auflösung, die jeweiligen Bänder und Gebiete auf. Die Bezeichnung pre und post bezieht sich in der gesamten Diplomarbeit auf den Aufnahmezeitpunkt der Satellitendaten, also ob sie vor (pre) oder nach (post) beziehungsweise während des Waldbrandes aufgezeichnet worden sind. Ein „x“ bedeutet, dass die Daten vorhanden sind, während ein leeres Feld das Gegenteil ausdrückt. Tabelle 2-2 führt zusätzlich die verschiedenen TerraSAR-X Satellitenbildaufnahmen der Region Grammatiko und La Palmas näher aus, wobei Abbildung 2-1 die Gebietsabdeckung der jeweiligen Szenen in Griechenland verdeutlicht. Der eingetragene Pfeil gibt dabei den Orbit, also die Flugrichtung, des Satelliten an. TerraSAR-X kann Daten während seines Fluges entweder von Norden nach Süden (*descending*), oder von Süden nach Norden (*ascending*) aufzeichnen. In Tabelle 2-2 werden auch vorhandene TerraSAR-X Archivdaten aufgeführt, da sich nach einer ausführlichen Literaturrecherche zur

Brandflächendetektion mit Mikrowellen ergab, dass dies nur auf Basis einer multitemporalen Analyse möglich ist.

Satellit	Räumliche Auflösung	Bänder	Griechenland		Spanien		Italien	
			Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
DMC	32 Meter	grün, rot, NIR	x	x		x		
IRS-P6	5 Meter	grün, rot, NIR, SWIR		x	x	x		
SPOT 5	10 Meter	grün, rot, NIR, SWIR		x	x	x	x	x
AVNIR-2	10 Meter	blau, grün, rot, NIR	x	x				x
IKONOS	2,5 Meter	blau, grün, rot, NIR		x				
Meris	160 Meter	15 (390 – 1040 nm)		x				
Rapid Eye	5 Meter	blau, grün, rot, RedEdge,Nir		x				
SPOT 4	20 Meter	grün, rot, NIR, SWIR					x	x
TerraSAR-X	siehe Tabelle 2	X	x	x	x	x		

Tabelle 2-1: Datengrundlage, eigene Darstellung

Gebiet	Datum	Modus	Polarisation	Orbit	Gebietsabdeckung
La Palma	09.08.2009	Spotlight	VV	<i>ascending</i>	ganze Brandfläche
La Palma	09.08.2009	Spotlight	HH	<i>ascending</i>	ganze Brandfläche
La Palma	13.12.2007	Stripmap	HH	<i>ascending</i>	ganze Insel
La Palma	09.08.2009	Stripmap	HH	<i>ascending</i>	ganze Insel
Griechenland	13.05.2008	Stripmap	VV	<i>descending</i>	nördlicher Teil der Brandfläche
Griechenland	29.08.2009	Stripmap	VV	<i>descending</i>	nördlicher Teil der Brandfläche
Griechenland	08.03.2009	Stripmap	HH	<i>ascending</i>	ganze Brandfläche
Griechenland	31.08.2009	Stripmap	HH	<i>ascending</i>	ganze Brandfläche

Tabelle 2-2: TerraSAR-X Datengrundlage, eigene Darstellung

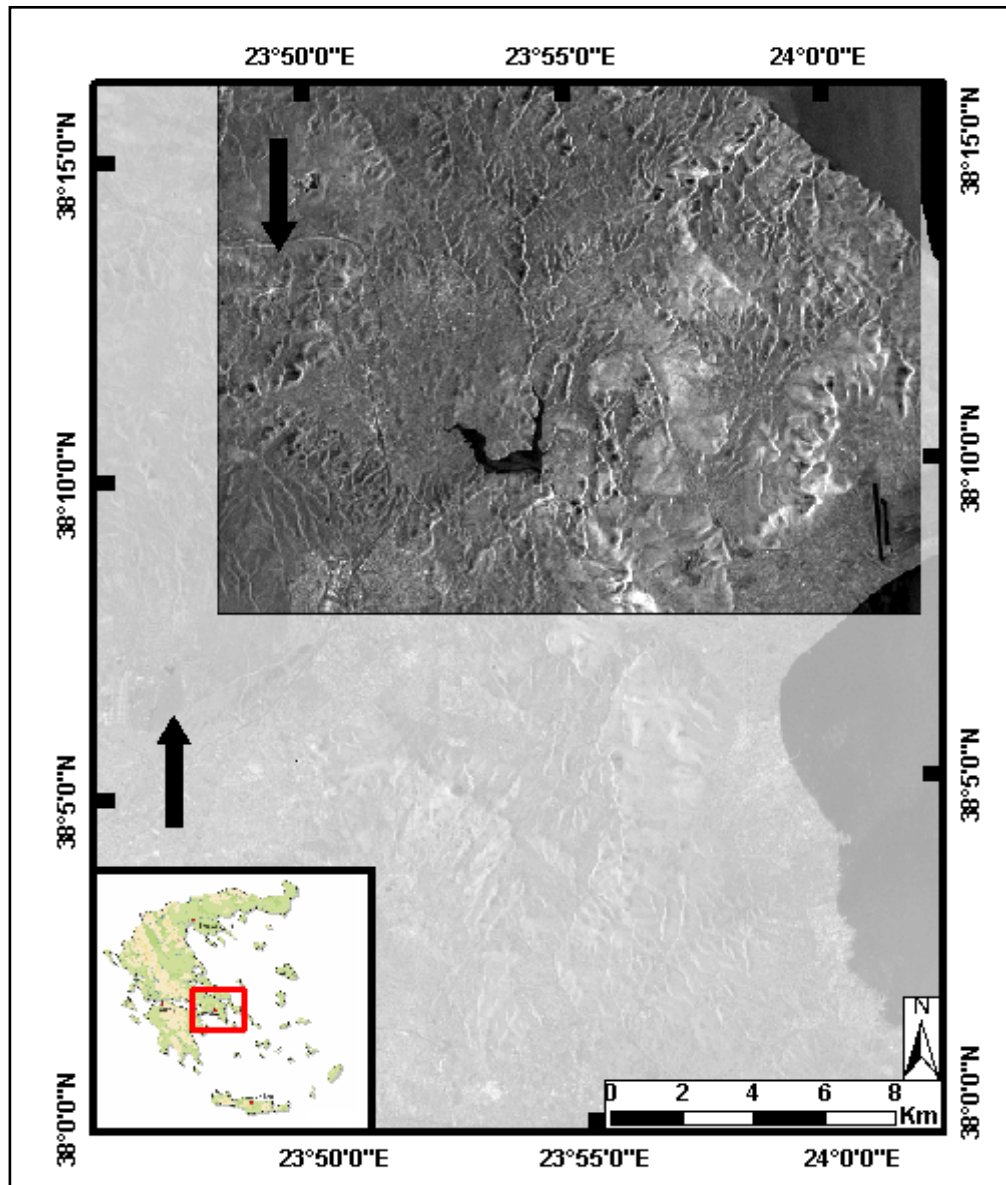


Abbildung 2-1: TerraSAR-X Datengrundlage 2009 in Griechenland, eigene Darstellung

Nach einer umfangreichen Literaturrecherche im passiven Bereich der Fernerkundung stellt sich heraus, dass vor allem das mittlere Infrarot für eine genaue Brandflächendetektion ausschlaggebend ist (siehe Punkt 3.1.1). Dies wird bei der Datenauswahl berücksichtigt. Da sowohl eine monotemporale als auch eine multitemporale Methode entwickelt werden soll, und die Methode auch auf ihre Übertragbarkeit hin geprüft werden soll, verbleiben als mögliche Satellitenbilddaten nur SPOT 5 und IRS-P6. Das IRS-P6 Satellitenbildpaar ist jedoch sowohl in Griechenland als auch in La Palma stark bewölkt, weshalb die Datenauswahl auf die SPOT 5 Satellitenbildszenen fällt. Ebenfalls ergibt sich nach einer umfassenden Archivdaten-Recherche, dass auch SPOT 5 Satellitenbildszenen für die Waldbrände in Griechenland von 2007 vorliegen, was zum Übertragbarkeitstest der Methode verwendet wird. Nähere Informationen zum SPOT 5 Satelliten liefert Punkt 3.1.3.

Im aktiven Bereich der Fernerkundung liegen ausschließlich TerraSAR-X Satellitenbildszenen vor, weshalb sich hier eine Auswahl erübrigt.

Da keine SPOT 5 und TerraSAR-X Satellitenbildszenen von Sardinien vorliegen, wird dieses Gebiet aus der Methodenentwicklung ausgeschlossen.

2.2.2 Digitale Geländemodelle

Wie unter 4.1.1 näher erläutert wird, muss das pre/post Satellitenbildpaar von Spanien georeferenziert werden. Aufgrund des ausgeprägten Reliefs sowohl in Spanien, als auch in Griechenland, ist ein digitales Geländemodell auch für die topographische Normalisierung im Zuge der Atmosphärenkorrektur (siehe Punkt 4.2.1) nötig. Zur Verwendung kommen hierfür zwei DLR-interne digitale Geländemodelle für die Region Grammatiko (Griechenland) und La Palma (Spanien) mit einer räumlichen Auflösung von 30 Meter. Um diese Geländemodelle für die Georeferenzierung und die Atmosphärenkorrektur verwenden zu können, werden sie mit Hilfe der *Software ERDAS* auf die SPOT 5 Satellitenbildszenen angepasst.

2.2.3 CORINE Landbedeckungs-Daten

Die *Coordination of Information on the Environment* (CORINE) sieht die europaweite Kartierung der Bodenbedeckung auf Basis von Satellitendaten vor, und ist ein Programm der Europäischen Union. Um einen einheitlichen, und damit vergleichbaren Datensatz der Bodenbedeckung in Europa zu garantieren, erfolgt die Erfassung in 44 einheitlichen Landnutzungsklassen. Die Klassifikationsnomenklatur besteht aus drei Hierarchien, die sich immer weiter aufgliedern. Die erste Ebene besitzt fünf Klassen, die zweite Ebene 15, und die dritte Ebene 44. Die Daten liegen im Maßstab 1:100.000, mit einer Lagegenauigkeit von 100 Metern vor, und stehen im Internet frei zur Verfügung. Die Ersterfassung erfolgte 1990, eine Aktualisierung des Datenbestandes erfolgte zum Bezugsjahr 2000. Seit Februar 2010 stehen neue Daten für Deutschland zum Bezugsjahr 2006 zur Verfügung. Für die ausgewählten Untersuchungsgebiete sind die neuesten Daten des Bezugsjahres 2006 noch nicht vorhanden, sodass die CORINE Landbedeckungs-Daten von 2000 verwendet werden (www.corine.dfd.dlr.de, www.eea.europa.eu).

Die Corine Daten werden als Überblick über die vorherrschende Vegetation, als Hilfestellung zur Schwere des Verbrennungsgrades und zur Bestandsaufnahme der verbrannten Flächen benötigt.

2.2.4 Referenzdaten

Um die Klassifikationsgenauigkeit der im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelten Methode validieren zu können, werden Referenzdaten der verbrannten Flächen benötigt. Einerseits werden dazu Referenzdaten des bereits unter Punkt 1.2.1 erwähnten EFFIS-Fire Service

bezogen. Diese Daten stehen mit Angabe der verbrannten Fläche im Internet frei zur Verfügung, jedoch nicht zum Herunterladen. Die Flächenangaben werden für eine erste Einschätzung der Brandfläche verwendet. Um die Brandfläche nicht nur flächenmäßig, sondern auch lagemäßig validieren zu können, werden die Waldbrände in Griechenland und Spanien in der *Software eCognition Developer* und *ArcGis* auf Grundlage der SPOT 5 Satellitenbildszenen selbst digitalisiert. Die Flächenangaben des Übertragbarkeitstests stammen aus der ZKI-Schnellkartierung der jeweiligen Waldbrände (siehe Kapitel 6).

2.3 Untersuchungsgebiete

Wie bereits unter Punkt 2.2.1 dargestellt wurde, fällt die Gebietsauswahl aufgrund der vorhandenen Satellitenbilddaten auf die Waldbrände der Region Grammatiko in Griechenland und die Insel La Palma in Spanien. Im Folgenden werden diese Gebiete mit den dazugehörigen Satellitenbildern genauer dargestellt.

2.3.1 Griechenland – Region Grammatico

Das erste Untersuchungsgebiet befindet sich in der Region Grammtico in Griechenland und wird im Zuge dieser Arbeit unter der Bezeichnung *Brandfläche Griechenland* geführt. Das Untersuchungsgebiet wird in Abbildung 2-2 in Form der SPOT 5 Satellitenbilddaufnahme vom 25.08.2009 dargestellt. Dabei handelt es sich um ein Falschfarbenbild, das in der Bandreihung mittleres Infrarot, nahes Infrarot und grün dargestellt wird. Diese Bandreihung wird gewählt, da sich hier die Brandfläche am deutlichsten von der Umgebung abhebt. Der Waldbrand befindet sich in nur circa 30 Kilometer Entfernung zu Athen, und liegt damit im Großraum der Hauptstadt. Als wichtiges Naherholungsgebiet wird die Region Grammatiko auch als grüne Lunge Athens bezeichnet. Die Zerstörung der Vegetation kann sich somit gravierend auf das Mikroklima Athens auswirken. Ebenfalls in Abbildung 2-2 miteinbegriffen ist die Landbedeckung des Untersuchungsgebietes anhand der CORINE Landbedeckungsklassen. Das Untersuchungsgebiet war vor dem Feuer hauptsächlich mit Hartlaubbewuchs, Wiesen und Weiden und einer Wald/Strauch Vegetation bedeckt. Der Brandflächenbereich liegt im Osten in unmittelbarer Nähe zum Golf *Petalion*, einem Nebenmeer der Ägäis. Im Norden grenzt die Brandfläche an den Golf von *Notios Evoikos*, ebenfalls ein Nebenmeer der Ägäis. Innerhalb von weniger als 10 Kilometer steigt das Relief von Meereshöhe auf bis zu 500 Meter an, und weist zahlreiche kleine Hügel auf. Dies beeinflusst die Beleuchtungseffekte und somit auch die Brandflächendetektion. Am 21.08.2009 brachen in dieser Region Waldbrände aus. Die Brände zerstörten nicht nur tausende Hektar Wald- und landwirtschaftliche Nutzfläche, sondern es mussten auch zahlreiche Anwohner evakuiert werden. Im Zuge der internationalen Charter *Space and Major Disasters* wurde das ZKI aktiviert und führte eine Schnellkartierung der Brandfläche auf Grundlage von SPOT 5 und IKONOS Daten durch. Der Waldbrand reicht im Westen bis an den Marathon-See heran. Das Gebiet ist von einer größeren Straße und vielen kleinen Ortschaften durchzogen, die Besiedelung ist jedoch relativ gering.

Zusätzlich zu den optischen Daten liegen vier TerraSAR-X Aufnahmen des Waldbrandgebietes vor. Punkt 2.2.1 gab hierzu bereits einen genaueren Überblick über die vorhandene Datengrundlage und Gebietsabdeckung.

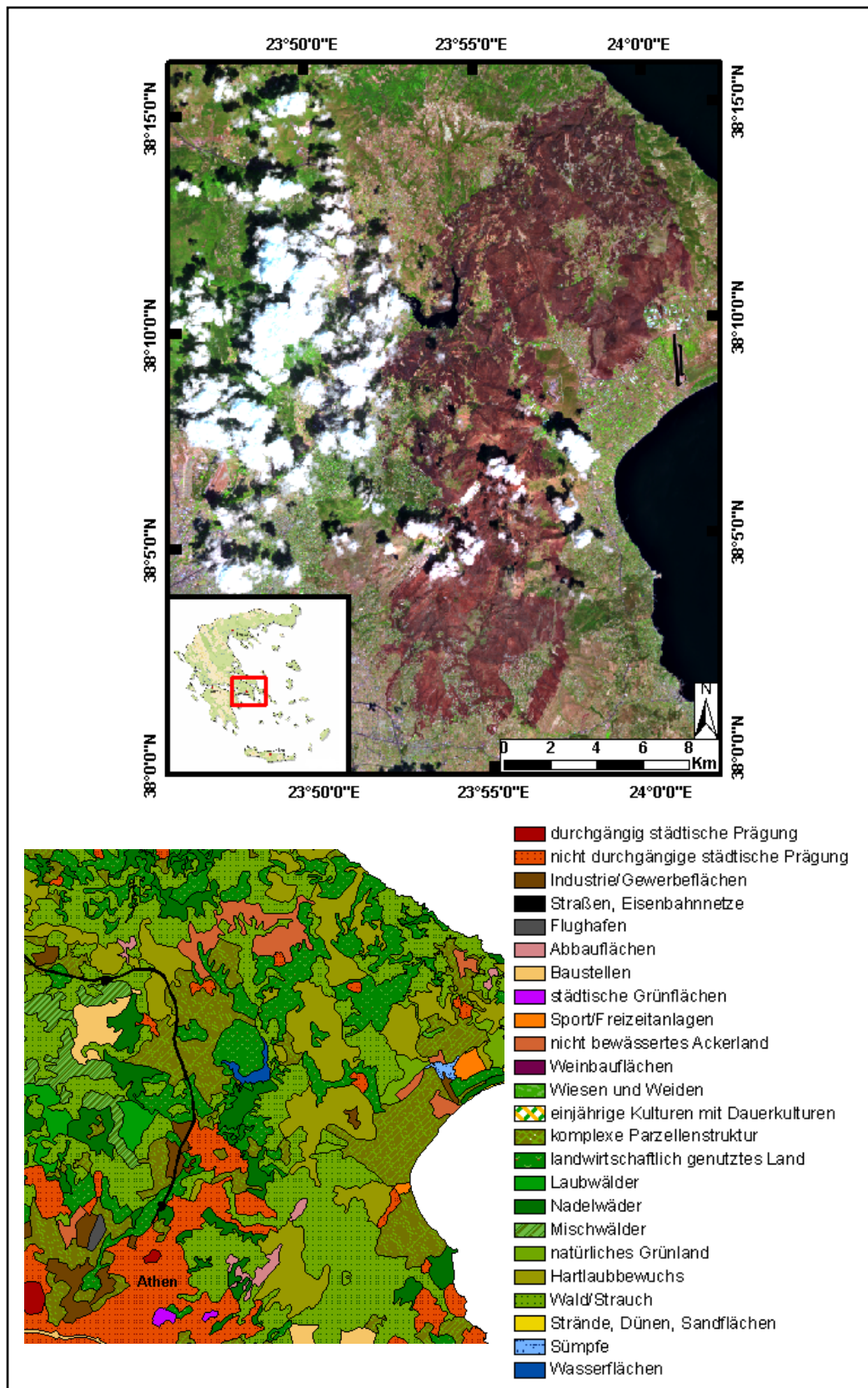


Abbildung 2-2: Gebietsüberblick der Brandfläche in Griechenland, eigene Darstellung

2.3.2 Spanien – La Palma

Das zweite Untersuchungsgebiet befindet sich auf La Palma. La Palma ist die nordwestlichste und entstehungsgeschichtlich älteste der sieben großen kanarischen Inseln. Alle Inseln des Archipels sind durch einen so genannten *hot spot* entstanden, und bestehen aus Lavagestein. Abbildung 2-3 (a) zeigt ein Falschfarbenbild (Bandkombination mittleres Infrarot, nahes Infrarot, grün) der SPOT 5 Satellitenbildaufnahme vom 07.08.2009. Die Insel zeichnet sich durch ihr sehr stark ausgeprägtes Relief aus, das im Bereich der Brandfläche innerhalb von weniger als fünf Kilometer von Meereshöhe auf über 1900 Meter ansteigt. Abbildung 2-3 (b) verdeutlicht die hohe Reliefenergie in einer zweifachen Überhöhung. Aufgrund des starken Reliefs ist die Insel in vielen Bereichen gar nicht, oder nur gering bevölkert.

Die Waldbrände auf La Palma sind zwischen dem 31.07.2009 und dem 03.08.2009 ausgebrochen, und zerstörten 30 Häuser und mehrere Weinberge. Über 4000 Anwohner mussten zeitweise evakuiert werden.

Abbildung 2-3 (c) zeigt die Vegetation der Insel nach den Landbedeckungsklassen von CORINE. Auf der Insel herrscht eine Vegetation bestehend aus Nadelwäldern, Wiesen und Weiden, Hartlaubbewuchs, regelmäßig bewässertem Ackerland, Obst/Beerenobstbeständen, Weinbauflächen und spärlicher Vegetation vor. Aufgrund des starken Reliefs und dem zur Vegetationsbildung ungünstigem Lavagestein sind große Teile der Insel nur sehr spärlich oder gar nicht bewachsen.

Hier soll auf eine Besonderheit der Insel La Palma näher eingegangen werden. Das in einigen Bereichen der Insel sehr dunkle Lavagestein (zum Beispiel an der südlichsten Spitze der Insel) weist ähnliche spektrale Reflexionseigenschaften auf wie die Brandfläche, was zu Fehlklassifikationen führen kann.

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass aufgrund des Bekanntheitsgrades der Insel La Palma im weiteren Verlauf der Arbeit von der Brandfläche auf La Palma (und nicht Spanien) gesprochen wird. Die Waldbrände in der Region Grammatico in Griechenland werden als Brandfläche Griechenland bezeichnet.

In Kapitel 2 wurde die Gebietscharakteristik sowohl des Mittelmeerraumes, als auch die der gewählten Untersuchungsgebiete näher beschrieben. Die vorhandene Datengrundlage wurde dargestellt, und die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Daten wurden aufgeführt. Im nächsten Kapitel soll auf die Brandflächendetektion mit Hilfe der Fernerkundung näher eingegangen werden.

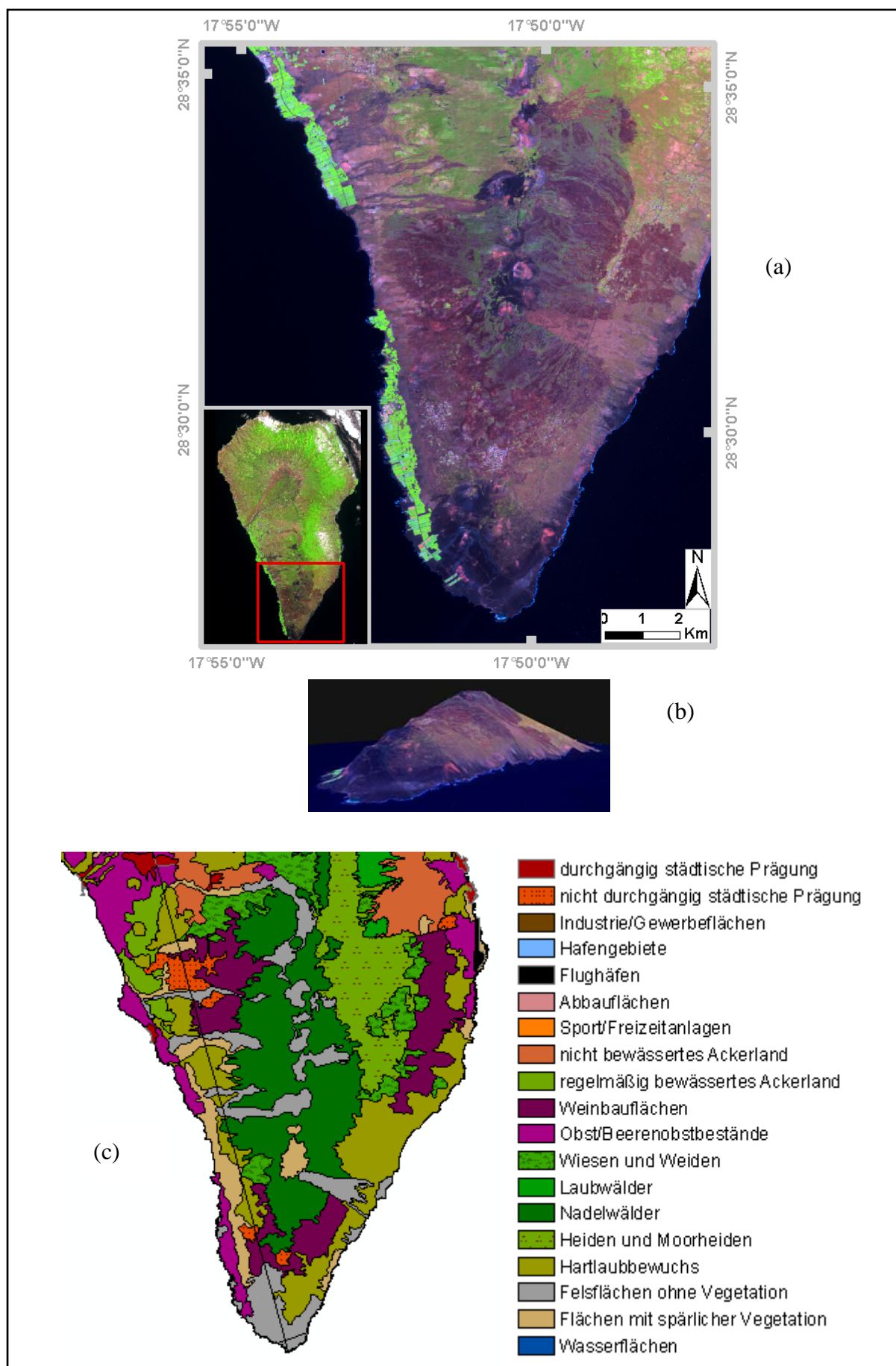


Abbildung 2-3: Gebietsüberblick der Brandfläche in La Palma, eigene Darstellung

3. Grundlagen der Fernerkundung zur Brandflächendetektion

In diesem Kapitel wird auf die spektralen Besonderheiten von Brandflächen, sowohl bei passiven, als auch bei aktiven Aufnahmesystemen näher eingegangen. Um die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Brandflächendetektion verstehen zu können, wird die Funktionsweise sowohl im passiven als auch im aktiven Bereich erläutert. Ebenfalls wird ein kurzer Literatur- und Methodenüberblick zur Brandflächendetektion gegeben. Die beiden verwendeten Satelliten SPOT 5 und TerraSAR-X werden eingehender beschrieben. Im Zuge dieser Arbeit verwendete Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden der Fernerkundung werden kurz erläutert.

„Remote sensing ist the science and art of obtaining information about an object, area or phenomenon through the analysis of data acquired by a device that is not in contact with the object, area, or phenomenon under investigation.“ (Lillesand et al. 2004: 1). Dies bedeutet, dass Bilder der Erdoberfläche aufgezeichnet werden können, ohne mit ihr in Berührung kommen zu müssen.

Laut Albertz 2007 ist jedes Bild das Ergebnis eines Abbildungsprozesses, dem sowohl geometrische als auch radiometrische (physikalische) Aspekte zugrunde liegen. Dabei sagt der geometrische Aspekt etwas über die räumliche Richtung, und der physikalische Aspekt etwas über die Intensität und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung aus. Grundsätzlich kann die Fernerkundung nach der Quelle der empfangenen Strahlung in aktive und passive Aufnahmesysteme unterschieden werden. Unter Punkt 3.1 wird auf die passiven Aufnahmesysteme eingegangen, während der Punkt 3.2 sich mit den aktiven Aufnahmesystemen näher beschäftigt. Für beide Aufnahmesysteme gleich ist das Grundprinzip der elektromagnetischen Strahlung. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich der verwendeten Wellenlängenbereiche und des Operationsmodus (Albertz

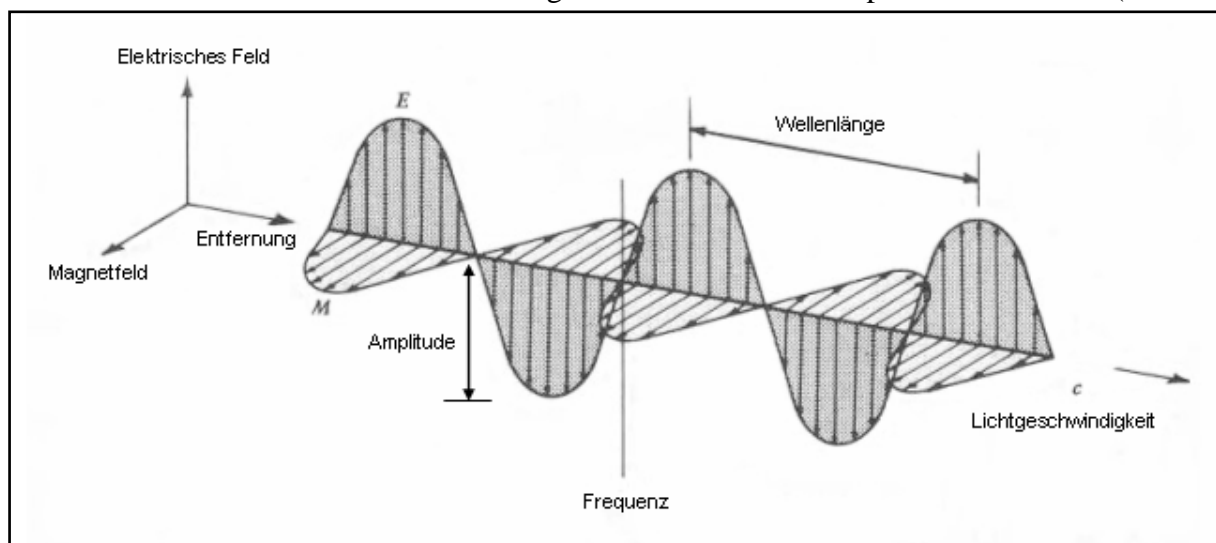


Abbildung 3-1: Elektromagnetische Welle, verändert nach: www.fe-lexikon.info

2007, Lillesand et al. 2004). Die elektromagnetische Strahlung besteht aus einer elektrischen und magnetischen Komponente, die sich gegenseitig bedingen, wodurch eine Bewegung entsteht. Abbildung 3-1 zeigt das Grundprinzip der elektromagnetischen Welle und Eigenschaften, durch die sie sich definieren lässt. Hierzu zählen zum Beispiel die Wellenlänge, die die Entfernung von einem Wellenscheitel zum nächsten angibt, die Amplitude, die die Höhe des Wellenscheitels beschreibt, die Frequenz, die die Anzahl der positiven Nulldurchgänge pro Sekunde definiert und die Polarisation, die die Richtung der Schwingungsebene angibt, und somit horizontal oder vertikal ausgerichtet sein kann.

Ein Sensor kann die elektromagnetische Strahlung in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums erfassen. Man kann das gesamte Spektrum je nach Art ihrer Entstehung und Wirkung der Strahlung in verschiedene Bereiche einteilen, die ohne scharfe Grenzen ineinander übergehen und sich teilweise überlappen (Albertz 2007). Abbildung 3-2 stellt das elektromagnetische Spektrum mit seinen verschiedenen Bereichen dar. Das menschliche Auge kann dabei nur einen sehr kleinen Ausschnitt von ca. 0,4 bis 0,7 μm wahrnehmen (Lillesand et al. 2004). Je nachdem, in welchem Wellenlängenbereich der empfangenen elektromagnetischen Strahlung die Datenaufnahme erfolgt, spricht man von Bändern. Wird gleichzeitig in verschiedenen Wellenlängenbereichen aufgenommen, spricht

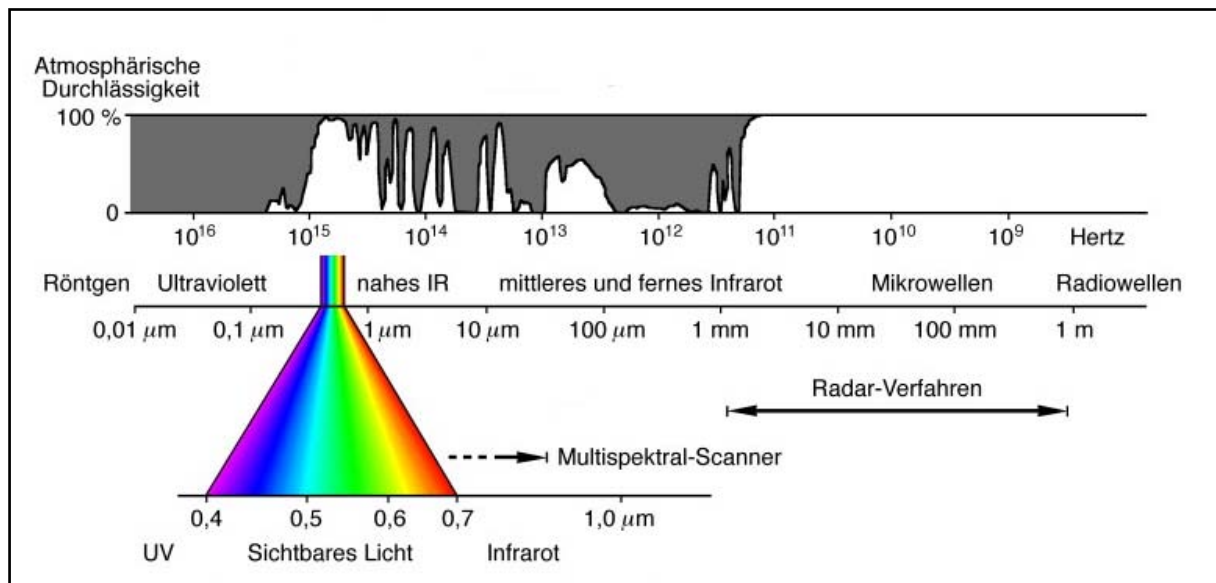


Abbildung 3-2: Elektromagnetisches Spektrum, verändert nach: www.fe-lexikon.info

man von einem Multispektralsystem (Albertz 2007). Passive Aufnahmesysteme können vom sichtbaren Bereich bis hin zum thermalen Infrarot aufzeichnen. Durch das Aufnehmen von Bereichen, die das menschliche Auge nicht erfassen kann, entstehen wertvolle zusätzliche Informationen in Satellitenbildern. So ist zum Beispiel die Reflexion der Vegetation im nahen Infrarot besonders hoch, und kann in diesem Bereich des elektromagnetischen Spektrums am Besten von anderen Landbedeckungsarten unterschieden werden. Der Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums den Radarsysteme zur Aufzeichnung verwenden, liegt von einem Millimeter bis zu einem Meter (Lillesand et al. 2004).

Ebenfalls wird in Abbildung 3-2 die Durchlässigkeit der Atmosphäre dargestellt, die die Fernerkundung maßgeblich beeinflusst. Bestimmte Wellenlängen werden in der Atmosphäre gestreut und können deswegen nicht aufgezeichnet werden. Bereiche, die die elektromagnetischen Wellen durchdringen können nennt man atmosphärische Fenster (Albertz 2007). Die wichtigsten Absorptionsbanden der Erdatmosphäre im solaren Spektrum sind Wasserdampf, Ozon, Sauerstoff, Kohlendioxid und Methan. Ebenfalls bewirken Aerosole (feste und flüssige Partikel in der Atmosphäre) und Moleküle eine breitbandige Abschwächung der solaren Einstrahlung (Blaschke 2002). Eine hohe Durchlässigkeit weist die Atmosphäre zum Beispiel im sichtbaren Bereich auf. Für die Mikrowellenstrahlung stellt die Atmosphäre keinerlei Hindernis dar.

Nach dem Plank'schen Wirkungsquantum (siehe Gleichung 3.1) ist die Energie einer elektromagnetischen Welle indirekt proportional zu ihrer Wellenlänge. Dies bedeutet für die Fernerkundung, dass längere Wellenlängen aufgrund ihrer geringeren Energie schwieriger zu messen sind. Dies setzt die räumliche Auflösung in diesen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums stark herab (Albertz 2007).

$$Q = \frac{hc}{\lambda}$$

3.1

Wobei:

Q = Energie

h = Plank'sche Konstante ($6,626 \cdot 10^{-32}$)

c = Lichtgeschwindigkeit (m/s)

λ = Wellenlänge (m)

3.1 Passive Aufnahmesysteme

Zunächst wird der optische Bereich der Fernerkundung im Hinblick auf die Brandflächendetektion vorgestellt. Unter optischer oder passiver Fernerkundung versteht man Systeme, die ausschließlich die in der Natur vorhandene elektromagnetische Strahlung nutzen. Dabei kann es sich um von der Sonne abgestrahlte und der Erde reflektierte Strahlung handeln, oder um die sogenannte Thermalstrahlung, die jeder Körper aufgrund seiner Eigenstrahlung abgibt (Albertz 2007, Lillesand et al. 2004). Je nachdem, wie die eintreffende Strahlung mit der Atmosphäre und den Oberflächenobjekten interagiert, ergeben sich spezielle Muster und Besonderheiten, anhand denen die Satellitenbilder ausgewertet werden können (Lillesand et al. 2004, Albertz 2007). Abbildung 3-3 verdeutlicht den Weg der extraterrestrischen Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche und zurück zum Sensor. Die Solarstrahlung erreicht von der Sonne kommend zunächst die oberen Schichten

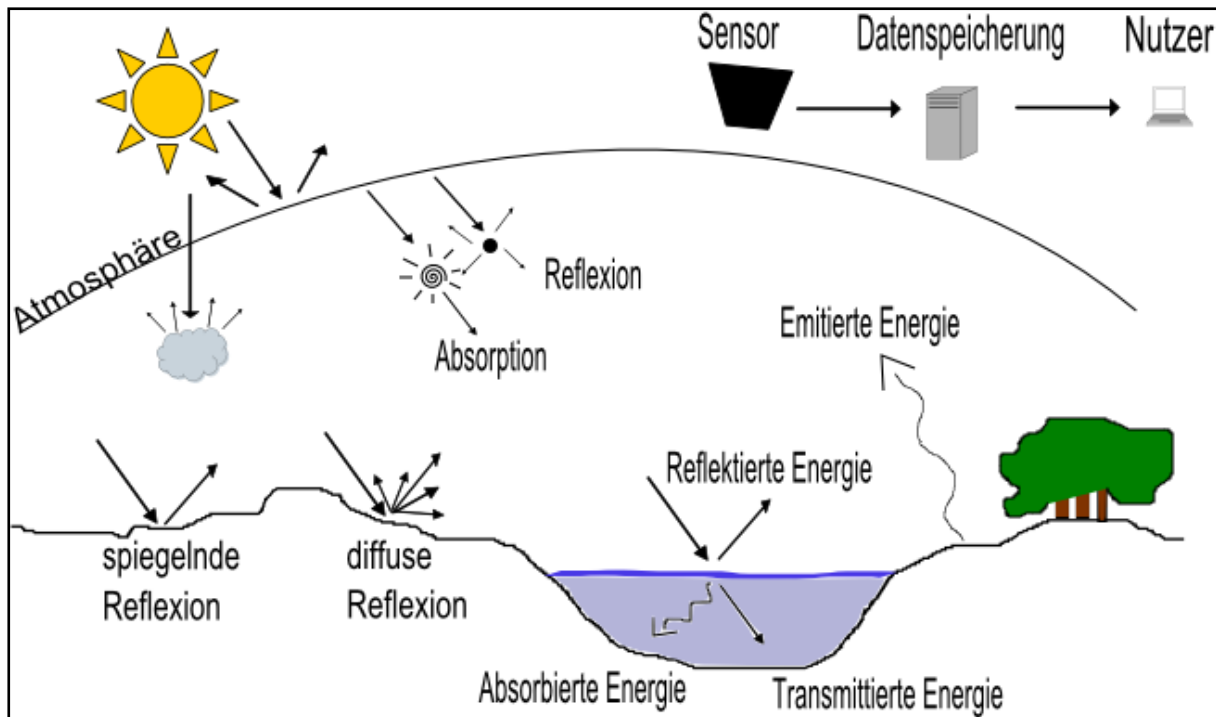


Abbildung 3-3: Streuung und Absorption, eigene Darstellung nach Lillesand et al. 2004 und Albertz 2007

der Atmosphäre, wo ein Teil zurück in den Weltraum reflektiert wird, der Rest jedoch bis zur Erdoberfläche durchdringen kann. Auf dem Weg zur Erdoberfläche unterliegt die Strahlung der Refraktion, der Absorption und der Streuung (Albertz 2007). Trifft die elektromagnetische Strahlung auf einen Körper, wird sie zum Teil reflektiert oder absorbiert, und die restliche Strahlung durchdringt den Körper (Transmission). Die Ausprägung der einzelnen Anteile variieren von Körper zu Körper und sind sowohl von der Beschaffenheit des Körpers, als auch von der Wellenlänge abhängig (Albertz 2007). Ebenfalls stellt Abbildung 3-3 die Weiterverarbeitung der am Sensor empfangenen Daten dar.

Im Folgenden wird auf die Charakteristik von Brandflächen näher eingegangen.

3.1.1 Spektrale Eigenschaften von Brandflächen

Waldbrände zerstören jegliche Art von Landbedeckung und reduzieren so zum Beispiel die Dichte und den Wassergehalt der Vegetation, verändern den Bodengehalt und entblößen den Boden. Dies spiegelt sich in veränderten spektralen Eigenschaften der vorherrschenden Bedeckung wieder. Ein Teil der eintreffenden Solarstrahlung wird als chemische Energie gespeichert, zum Beispiel in der Photosynthese. Diese temporär gespeicherte Energie wird durch die Zerstörung der Vegetation durch das Feuer in Wärmeenergie umgesetzt (Lauer & Bendix 2006). Im Folgenden wird genauer erläutert, welche Veränderung der Reflexion in unterschiedlichen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums nach einem Waldbrand von verschiedenen Autoren beobachtet werden konnte. Zum Ende eines jeden Bereiches wird kurz erwähnt, wie sich die Reflexion des Waldbrandes über La Palma im Vergleich zur vorher

bestehenden Vegetation verändert. Über den Waldbrand in Griechenland kann hierzu keine Aussage getroffen werden, da eine Satellitenbildszene vor den Waldbränden nicht zur Verfügung steht. Die Reflektivität verschiedener Landbedeckungsarten in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen der Brandfläche in Griechenland wird jedoch in Punkt 5.1.2 näher beschrieben.

Sichtbarer Bereich (0,4 – 0,7 μm)

Die Reflektivität der Vegetation ist im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums gering, was die Brandflächendetektion daher kaum ermöglicht (Pereira et al. 1999). Erschwerend kommt hinzu, dass der Wertebereich, der sich zur Unterscheidung zwischen verbrannten und unverbrannten Gebieten eignet, relativ gering ist, und die Hintergrundstreuung den Kontrast dunkler Flächen stark mindert (Pereira et al. 1999). So unterscheiden sich die spektralen Reflektivitätseigenschaften von Brandflächen nach dem Zeitpunkt der Aufnahme, dem Ökosystem, der Art der Bedeckung und der Schwere des Brandes. Ohne eine genaue Analyse der lokalen Bedingungen, die auch eine Untersuchung des Reflektivitätsverhaltens des Bodens mit einschließen sollte, ist daher eine generelle Aussage über die Zu- oder Abnahme der Reflektivität im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums nicht möglich (Arino et al. 2001). So konnten die meisten Autoren einen Anstieg der Reflexion über verbrannten Flächen beobachten (Pereira & Setzer 1993, Koutsias & Karteris 1996, Pereira et al. 1999), einige jedoch auch einen Rückgang (Frederiksen et al. 1990, Jakubauskas et al. 1990, Langaas & Kane 1991). Im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird das Meiste der eintreffenden Strahlung von der Vegetation absorbiert und in Wärmeenergie oder zur Photosynthese umgewandelt (Lauer & Bendix 2006). Wird die Vegetation zerstört, nimmt die Absorption aufgrund des Fehlens von Chlorophyll in diesem Bereich ab, was den Anstieg der Reflexion im sichtbaren Bereich erklärt (Pereira et al. 1999).

Über den Brandflächen von La Palma konnte ein leichter Anstieg der Reflektivität über der Brandfläche im Vergleich zur Satellitenbildaufnahme vor dem Brand festgestellt werden.

Nahes Infrarot (0,7 – 1,3 μm)

Die Vegetation besitzt im Bereich des nahen Infrarots einen ausgeprägten Anstieg der Reflektivität, was häufig als „red edge“ bezeichnet wird (Lillesand et al. 2004). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Absorption von Vegetation hier gering ist, die Reflexion und Transmission jedoch sehr hoch (Lauer & Bendix 2006). Da Waldbrände meist die gesamte bestehende Vegetation vernichten, ist hier die Reflektivität am höchsten, und die Reflexionswerte nehmen stark ab (Langaas & Kane 1991, Pereira & Setzer 1993, Hlavka et al. 1996, Koutsias & Karteris 1996). Lediglich Pereira et al. 1999 konnte einen Anstieg der Reflektivität über einer kürzlich verbrannten Fläche feststellen.

Das Satellitenbildpaar von La Palma bestätigt die Beobachtung der meisten Autoren, und so findet sich im nahen Infrarot die stärkste Reflektivitätsdifferenz zwischen beiden

Satellitenbildszenen, wobei das post-Bild Reflexionswerte von weniger als der Hälfte der Reflexionswerte des pre-Bildes aufweist.

Mittleres Infrarot (1,3 – 8,0 μm)

Ähnlich dem sichtbaren Bereich konnte auch im mittleren Infrarot bei den meisten Autoren keine signifikante Veränderung des Rückstrahlverhaltens über verbrannten Flächen festgestellt werden. Abhängig von der Vegetation nimmt die reflektierte Strahlung teilweise ab (Savannenvegetation) (Eva et al. 1995), oder steigt an (tropischer und borealer Nadelwald) (Pereira & Setzer 1993, Koutasis & Karteris 1996, Pereira et al. 1999). Das mittlere Infrarot steigt aufgrund des Rückgangs des Feuchtegehalts, der Zunahme der Exponiertheit von Boden und Fels, und aufgrund von weniger Schatten spendender Vegetation an (Gitas et al. 2009, Arino et al. 2001). Dies ist laut Pereira et al. 1999 auf einen Verlust von Wasser in den Blättern zurückzuführen. Nach Lauer & Bendix 2006 absorbiert die Vegetation ab einer Wellenlänge von etwa zwei Mikrometer die einfallende elektromagnetische Strahlung. Fehlt diese absorbierende Eigenschaft, erklärt dies eine höhere Reflektivität über der Brandfläche.

Über der Brandfläche des Satellitenbildpaares von La Palma können beide Aussagen zur Veränderung des Reflexionsverhaltens festgestellt werden. In Bereichen von dichter Vegetation wie Nadelwald steigt der Reflexionswert über der Brandfläche an, in Bereichen spärlicher Vegetation (Heidekraut, Hartlaubbewuchs) nimmt der Reflexionswert jedoch ab. Nach Pereira et al. 1999 und Lauer 2006 besteht der Anstieg über einer Brandfläche aufgrund des Fehlens der absorbierenden Fähigkeiten der Vegetation. In Bereichen spärlicher Vegetation ist es deswegen nicht verwunderlich, dass kein Unterschied oder eine geringe Abnahme beobachtet werden kann.

Thermales Infrarot (8,0 – 14,0 μm)

Das Fehlen der Evaporation, die normalerweise Energie in Form von latenter Wärme in die Atmosphäre abtransportiert, und die starke Absorption solarer Strahlungsdichte über einer Brandfläche führen zu einem hohen Temperaturanstieg (Arino et al. 2001). Verstärkt wird dieser Prozess durch die entstehenden Asche und Kohlepartikel, die eine trockene Oberfläche erzeugen. Der Nutzen thermaler Daten zur Brandflächendetektion hängt jedoch stark vom Aufnahmezeitpunkt und der Beschaffenheit der Atmosphäre ab. So hält zum Beispiel ein Temperaturanstieg im borealen Nadelwald nach einem Waldbrand für mehrere Jahre an, was leicht zur Fehlannahme eines aktiven Brandes führen kann (Arino et al. 2001). Alle Autoren konnten einen Anstieg der Rückstrahlung, allerdings erst nach einem Mindestzeitabstand von vier Monaten nach dem Feuer beobachten (Pereira & Setzer 1993, Eva et al. 1995, Hlavka et al. 1996). Dies liegt an der Erwärmung des Bodens nach einem Waldbrand, da die schattenspendende Vegetation fehlt, die Bodenoberfläche ein geringeres Albedo aufweist und veränderte Bodenwasserbedingungen nach einem Brand herrschen (Pereira et al. 1999). Generell wird das thermale Infrarot aufgrund seiner geringen räumlichen Auflösung (siehe Punkt 3) eher zur generellen Erkennung eines Brandes, (*hot spot* Detektion) als zur genauen Flächenerfassung einer Brandfläche verwendet.

Über eine veränderte Reflektivität im thermalen Bereich kann bei SPOT 5 Satellitenbildszenen keine Aussage getroffen werden, da dieser Sensor über kein Band in diesem Bereich des elektromagnetischen Spektrums verfügt.

Im Falle einer Veränderungsanalyse erweist sich das nahe Infrarot am geeignetsten zur Brandflächendetektion.

3.1.2 Vergleich verschiedener Sensoren zur Brandflächendetektion

In diesem Punkt soll ein Überblick darüber gegeben werden, welche Satelliten am häufigsten zur Brandflächendetektion verwendet werden. Tabelle 3-1 führt die verschiedenen Satelliten mit ihren Eigenschaften auf. Ebenfalls werden die verwendete Methode zur Brandflächendetektion, das Gebiet und der Autor dargestellt. Generell kann man die Auflösung eines Satelliten in räumliche und zeitliche Auflösung unterscheiden. Beide sind miteinander gekoppelt, wobei die räumliche Auflösung umso höher ist, je niedriger die zeitliche Auflösung und umgekehrt (Koutsias & Karteris 1999). Deswegen kommt die Auswahl des Satelliten stark auf das Ziel der Analyse an. So werden räumlich niedrig aufgelöste, aber zeitlich hoch aufgelöste Satelliten meist zur Waldbranderkennung (*hot spot*), räumlich hoch aufgelöste und zeitlich niedrig aufgelöste Satelliten hingegen zur genauen Detektion des Brandausmaßes verwendet (Chand et al. 2006, Gitas et al. 2004). Das bereits unter Punkt 2.1 angesprochene stark reliefierte und defragmentierte mediterrane Ökosystem erlaubt niedrig aufgelösten Sensoren kein ausreichendes Verständnis der vorherrschenden Bedingungen. Ebenfalls bietet der mediterrane Raum keine Fläche für extrem große Waldbrände (Koutsias & Karteris 1999). Die Waldgebiete sind begrenzt, und durch die vielfältige und verschiedene Nutzung des Gebietes stark zerklüftet. Es ist demnach wichtiger, räumlich hoch auflösende Satelliten zu verwenden, um das verbrannte Gebiet genau detektieren zu können. Ebenfalls vermindert eine hohe räumliche Auflösung das Auftreten von Mischpixeln, was das Fehlklassifikationsproblem vermindert (Koutsias & Karteris 1999). Bei hochauflösenden Satellitenbildszenen ist es außerdem möglich, unverbrannte Gebiete innerhalb der Brandfläche zu erkennen. Diese Aspekte sind vor allem im Hinblick des Krisenmanagements ein wichtiger Punkt. Den Helfern vor Ort soll das verbrannte Gebiet so genau wie möglich mitgeteilt werden, um akkurate Hilfe garantieren zu können.

Ein weiteres, genauso wichtiges Auswahlkriterium stellen die Bänder da, in denen ein Satellit operiert. Wie die Punkte 3.1.1 und 5.1.2 zeigen, besitzt eine Brandfläche verschieden starke Reflexionseigenschaften in den unterschiedlichen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums. Es ist daher essentiell, Satelliten zu verwenden, die in diesen Spektren operieren.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Brandflächendetektion besitzt die Grundvoraussetzung übertragbar zu sein. Die in Tabelle 3-1 dargestellte *principal component analysis (PCA)* komprimiert die Datenfülle der verschiedenen Bänder, aufgrund dessen die gewünschte Information des Satellitenbildes in einem Band besonders stark herauskommt

(Lillesand et al. 2004). Welche Komponente dies ist, variiert jedoch von Satellitenbild zu Satellitenbild, weswegen die PCA Methode die Grundvoraussetzung der Übertragbarkeit nicht erfüllt und nicht näher behandelt wird. Der interessierte Leser sei hier an Lillesand et al. 2004 verwiesen.

Die meisten Autoren (siehe Tabelle 3-1) verwenden verschiedene spektrale Indices zur Brandflächendetektion. Dieses Verfahren ist sowohl auf mono- als auch multitemporale Verfahren anwendbar und erfüllt die Grundvoraussetzung der Übertragbarkeit (Koutsias & Karteris 1999). Im Zuge dieser Arbeit wird die Brandflächendetektion ebenfalls mit spektralen Indices durchgeführt, da dieses Verfahren die Grundvoraussetzung der Übertragbarkeit erfüllt, und nach einer ausführlichen Literaturrecherche die besten Klassifikationsergebnisse verspricht. Näheres dazu, welche Indices dafür in Frage kommen und welche ausgewählt werden, findet sich unter Punkt 5.1.4.

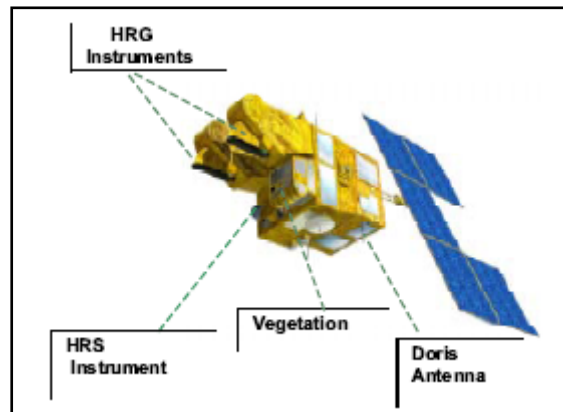
Sensor	Auflösung		Bänder in μm	Methode	Region	Autor & Jahr
	Räumlich	Zeitlich				
Landsat TM	30 Meter	16 Tage	1: 0,45 – 0,52	Spektrale Indices	Malaysia	Phua et al. 2007
			2: 0,52 – 0,60	<i>Logistic regression modelling</i>	Griechenland	Koutsias & Karteris 2000
			3: 0,63 – 0,69	Spektrale Indices	Griechenland	Mitri & Gitas 2004
			4: 0,76 – 0,90	<i>Principal Component Analysis</i>	Griechenland	Koutsias et al. 2009
			5: 1,55 – 1,73			
			7: 2,08 – 2,35	Spektrale Indices	Alaska	Epting et al. 2005
			6: 10,4 – 12,5	Spektrale Indices	Afrika	Roy et al. 2006
AVHRR	1,1 Km	12 h	1: 0,58 – 0,68 2: 0,72 – 1,10 3: 3,55 – 3,93 4: 10,5 – 11,5	Spektrale Indices	Afrika	Barbosa et al. 1998
				Spektrale Indices	Borealer Nadelwald	Fraser et al. 2000
				Spektrale Indices	Borealer Nadelwald	Chuvienco et al. 2008
				Spektrale Indices	Spanien	Gitas et al. 2004
				Spektrale Indices	Spanien	Fernández et al. 1997
				Spektrale Indices und Temperatur	Spanien	Pozo et al. 1997
				Spektrale Indices	Borealer Nadelwald	Rommel & Perera 2000
				Spektrale Indices	Alaska	Kasischke & French 1995
MODIS	250 Meter – 1 Km	1 – 2 Tage	36 Bänder, 3,929 – 3,989	Spektrale Indices	Iberische Halbinsel	Chuvienco et al. 2005
				Spektrale Indices	Borneo, Sumatra	Liew et al. 2006
				Spektrale Indices	Afrika	Roy et al. 2002,2005

				Spektrale Indices	Russland	George et al. 2006
SPOT-VEGETATION	1,15 Km	26 Tage	1: 0,43 – 0,47 2: 0,61 – 0,68 3: 0,79 – 0,89 4: 0,50 – 0,73 5: 1,58 – 1,75	Spektrale Indices	Borealer Nadelwald	Fraser & Li 2002
				Spektrale Indices	Mexiko	Boschetti 2003
				Spektrale Indices	Australien	Stroppiana et al. 2002
				Spektrale Indices	Afrika	Silva & Pereira 2005
				Spektrale Indices	Italien	Lasponara 2006
				Lineare Regressionsmodelle	Kanada	Fraser et al. 2003
ASTER	15 – 90 Meter	½ Tag	14 verschiedene spektrale Bänder, sichtbarer Bereich, nahes, mittleres und thermales Infrarot	Spektrale Indices	Mediterraner Raum	Stroppiana et al. 2009
				Spektrale Indices	Kanarische Inseln	Alonso-Benito et al. 2008
DMSP-OLS	3 Km	12 h	Sieben verschiedene Bänder	Temperatur	Indonesien	Stolle et al. 2004
AVIRIS (airborne visible infrared imaging spectrometer)	je nach Flughöhe		224 verschiedene Bänder von 0,4 – 2,5	Spektrale Indices	Kalifornien	Wagtendonk et al. 2004
SAC-C/MMRS	175 Meter	16 Tage	1: 0,48 – 0,50 2: 0,54 – 0,56 3: 0,63 – 0,69 4: 0,78 – 0,84 5: 1,55 – 1,70	Spektrale Indices	Spanien	García & Chuvieco 2004

Tabelle 3-1: Stand der Forschung optische Brandflächendetektion

3.1.3 SPOT 5

Der im Zuge dieser Arbeit zur optischen Brandflächendetektion verwendete Satellit SPOT 5 soll hier kurz näher beschrieben werden. Die französische Regierung hat in einem Joint-Programm mit Schweden und Belgien die Entwicklung des *Systeme Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) durchgeführt. Die SPOT Satellitenreihe startete 1986 mit dem SPOT 1 Satelliten. Seitdem wird diese Mission mit den darauf folgenden Satelliten SPOT 2-5 weitergeführt (Dagras et al. 1995). Der Satellit trägt zwei identische Instrumente, die HRG (*High Resolution Geometry*) genannt werden, mit sich. Die Möglichkeit der Stereoanwendung komplementiert somit die SPOT 5 Mission. Der Satellit fliegt ebenfalls ein spezifisches *High Resolution Stereo Instrument* (HRS) mit sich, das aus zwei Teleskopen besteht, die eine 20° *fore view* und eine 20° *aft view* über eine Streifenbreite von 120 Kilometer erlauben. Als dritte Mission trägt der Satellit die gering auflösende Vegetationsmission (VMI) für eine tägliche



Sensor	Typ	Bänder	Räumliche Auflösung in Meter	Streifenbreite in Kilometer	Zeitliche Auflösung in Tagen
VMI	Multispektral	0,43 – 0,47 (blau) 0,61 – 0,68 (rot) 0,78 – 0,89 (NIR) 1,58 – 1,75 (SWIR)	1000	600 x 120	1
HRS	Multispektral	0,5 – 0,59 (grün) 0,61 – 0,68 (rot) 0,79 – 0,89 (NIR) 1,58 – 1,75 (SWIR)	10 10 10 20	60	26
HRG	Panchromatisch	0,61 – 0,68	5		

Abbildung 3-4: SPOT 5, verändert nach Gleyzes et al. 2003 und Shefali 2004

Abdeckung mit sich. Die gesendeten Daten können überall auf der Welt empfangen werden. Abbildung 3-4 mit der dazugehörigen Tabelle stellt sowohl den Satelliten als auch seine

mitgeführten Missionen genauer dar. Der SPOT 5 Satellit fliegt in einem sonnensynchronen Orbit in einer Höhe von 832 km, mit einem Neigungswinkel von 98,7°.

Die Reihenfolge der vier verschiedenen Bänder des SPOT 5 Sensors, wird in der gesamten Arbeit mit Band 1 = grün, Band 2 = rot, Band 3 = nahes Infrarot und Band 4 = mittleres Infrarot beibehalten.

3.1.4 Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden

Die Fernerkundung bietet eine große Vielfalt an Verfahren, die zum endgültigen Klassifikationsergebnis führen können. An dieser Stelle werden die in dieser Diplomarbeit verwendeten Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden näher erläutert, und erklärt weswegen diese Verfahren ausgewählt werden. In Kapitel 5 wird im Rahmen der Methodenentwicklung beschrieben, wie die einzelnen Verfahren in dieser Arbeit umgesetzt werden. Stehen verschiedene Verfahren für die einzelnen Vorverarbeitungsschritte und Auswertemethoden zur Verfügung, wird kurz begründet welches Verfahren im Zuge dieser Arbeit Verwendung findet.

Unüberwachte Klassifikation

Pixelbasierte Verfahren analysieren jedes einzelne Pixel nach seiner spektralen Eigenschaft und teilen diese anschließend in Klassen auf, die ähnliche spektrale Eigenschaften aufweisen. Bei der unüberwachten Klassifikation wird das Satellitenbild in eine vom Nutzer vorgegebene Anzahl von Klassen eingeteilt, ohne dass vorher Trainingsgebiete für die einzelnen Klassen vorgegeben werden. Hier liegt der Unterschied zur überwachten Klassifikation, bei der der Anwender Trainingsgebiete für die einzelnen Klassen im Satellitenbild ausweist, und der Computer dann das gesamte Bild nach den spektralen Eigenschaften der einzelnen Bildelemente einer vorgegebenen Klassenanzahl zuweist. Der Vorteil zur überwachten Klassifikation liegt darin, dass nur der Computer die Auswertung ähnlicher spektraler Eigenschaften der Bildelemente übernimmt, was eventuell zu Klassen führen kann, an die der Nutzer gar nicht gedacht hätte. Man geht somit unvoreingenommener, ohne eine vorherige Wertung durchzuführen, an die Bildeinteilung heran. Somit kreiert der Algorithmus die vorgegebene Anzahl an Klassen und der Nutzer hat die Aufgabe, ihren Informationsgehalt zu interpretieren (Lillesand et al. 2004, Albertz 2007).

Die pixelbasierte Methode wird zu einer ersten Klasseneinteilung der Satellitenbilder verwendet.

Objekte versus Pixel

Die objektbasierte Klassifikation generiert Objekte aus einer Gruppe von Bildelementen im Zuge einer Bildsegmentierung. Um zu begründen, weswegen die objektbasierte Klassifikation zur Algorithmusentwicklung verwendet wird, werden die Vor- und Nachteile der objektbasierten Klassifikationsmethode gegenüber pixelbasierten Verfahren erläutert.

Ein Nachteil der pixelbasierten Klassifikation ergibt sich daraus, dass einzelne Pixel ohne ihr Umfeld betrachtet werden, und somit leicht fehlklassifiziert werden können (Blaschke & Strobl 2001). Bei objektbasierten Verfahren wird hingegen von der Annahme ausgegangen, dass ein Pixel mit einer hohen Wahrscheinlichkeit die gleiche Klassenzugehörigkeit wie seine Nachbarpixel aufweist (Blaschke & Strobl 2001). Das bedeutet, der Bildraum wird zunächst in homogene Regionen, bestehend aus spektral ähnlichen Bildelementen, unterteilt. Daraus entstehen so genannte Objektprimitive, die anhand von nutzerdefinierten Regeln (zum Beispiel spektralen Eigenschaften) zu homogenen Objekten klassifiziert werden.

Keine Klasse ist spektral zu 100 Prozent von den restlichen Klassen abgrenzbar. Hier liegt ein großer Vorteil der zur objektbasierten Klassifikation verwendeten *Software eCognition Developer*, da mit Hilfe der *Fuzzy-Logic* Aussagen getroffen werden können, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Objekt der jeweiligen Klasse zugeordnet wird (Koch et al. 2003). Die Objekte können aufgrund ihrer Struktur, Textur, Form, statistischen Kennwerte, Topologie, Nachbarschaft und räumlichen Beziehungen einer bestimmten Klasse zugewiesen werden. Somit wird nicht nur die Information eines einzelnen Pixels, sondern auch die seiner Nachbarschaft zur Klassifikation berücksichtigt. Der Benutzer kann somit sein Wissen in die Klassifikation mit einfließen lassen (Schiewe 2002). Pixelbasierte Verfahren können hingegen nur zu 100 Prozent einer Klasse angehören oder nicht.

Mit einer neuen Generation von hochauflösenden Sensoren ist immer mehr das Problem aufgetreten, dass pixelbasierte Verfahren das Satellitenbild nicht mehr ausreichend erfassen können. Je höher die räumliche Auflösung ist, umso mehr nimmt das Problem spektraler Mischpixel ab, was jedoch dazu führt, dass die spektralen Charakteristika innerhalb einer Landbedeckungsklasse immer vielfältiger werden, und sich mit denen anderer Klassen teilweise überlappen (Carleer et al. 2005). Dies führt bei einer pixelbasierten Klassifikation dazu, dass die Klassen nicht homogen erfasst werden können. Es können keine Objekte generiert werden, die dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen entsprechen (Koch et al. 2003). Vor allem im Hinblick auf eine weiterführende Analyse mit Geoinformationssystemen, ist es wichtig Objekte zu erhalten, die die Realität so gut wie möglich abbilden (Schiewe 2002).

Jedoch enthält die Bildung von Objekten den Nachteil, dass damit eine Generalisierung und somit ein Informationsverlust einhergeht, was bei pixelbasierten Verfahren nicht der Fall ist (Koch et al. 2003).

Die Wahl des richtigen Verfahrens hängt sowohl von den Eingangsdaten, als auch von der gegebenen Fragestellung der Analyse ab. Bei komplexen Untersuchungsgebieten, hoch auflösenden Satellitenbilddaten und Veränderungsanalysen stellt die objektbasierte Klassifikation im Vergleich zur pixelbasierten eine Verbesserung dar (Blaschke 2010, Delenne et al. 2008, Kamagata et al. 2008, Schiewe 2002, Niemeyer et al. 2008).

Das objektbasierte Verfahren besitzt vor allem für texturreiche Satellitenbilder, wie Radarbilder oder hochauflösende Satellitendaten, zahlreiche Vorteile gegenüber pixelbasierten Verfahren und wird im Zuge dieser Arbeit für die Klassifikation der Brandfläche verwendet.

Multitemporale Verfahren

Multitemporale Verfahren (*change detection*) beinhalten multitemporale Datensätze, um Veränderungen in der Landbedeckung erkennen zu können (Lillesand et al. 2004). Idealerweise sollten die Daten für eine Veränderungsanalyse vom gleichen Sensor aufgenommen werden, mit der gleichen räumlichen Auflösung, der gleichen Aufnahmegeometrie, den gleichen spektralen Bändern, der gleichen radiometrischen Auflösung, unter gleichen atmosphärischen Bedingungen, zur gleichen Jahreszeit und dem gleichen Tageszeitpunkt (Lillesand et al. 2004). Abweichungen hiervon können zu Fehlern im Klassifikationsergebnis führen (Koutsias & Karteris 1999). Die multitemporalen Daten müssen deswegen so genau wie möglich aufeinander abgestimmt sein. Eine geometrische und atmosphärische Korrektur, die eine topographische Normalisierung mit einschließt, stellen Grundvoraussetzungen für eine Veränderungsanalyse dar (Lu et al. 2004, Niemeyer et al. 2008, Kennedy et al. 2009, Roy et al. 2002, Key & Benson 2006, Richter 2010). Es gibt zahlreiche verschiedene Verfahren eine Veränderungsanalyse durchzuführen. Nach Lu et al. 2004 können sie in folgende sieben Kategorien eingeteilt werden: Algebra, Transformation, Klassifikation, *advanced models*, geographische Informationssysteme, visuelle Analysen und andere Ansätze. Diese sieben Kategorien gliedern sich wiederum in zahlreiche Unterkategorien auf, die im Zuge dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet werden. Der interessierte Leser sei für weitere Informationen an Lu et al. 2004 verwiesen. Jedes Verfahren weist seine eigenen Vor- und Nachteile auf. Daher kommt es auf die gegebene Fragestellung an, welches Verfahren gewählt werden soll. Im Zuge dieser Arbeit wird eine algebraische Veränderungsanalyse gewählt. Nähere Ausführung hierzu siehe in Kapitel 5.

Geometrische Korrektur

Um Verzerrungen, die durch das Aufnahmesystem und das Geländere Relief hervorgerufen werden zu eliminieren, und die Daten auf ein bestimmtes Referenzsystem anpassen zu können, ist eine geometrische Transformation nötig (Albertz 2007). Um dies zu bewerkstelligen benötigt man so genannte Passpunkte. Diese müssen sowohl im Satellitenbild, als auch auf dem Referenzbild eindeutig zu identifizieren sein (zum Beispiel Straßenkreuzungen). Mit Hilfe dieser Punkte können geometrische Beziehungen zwischen dem Satellitenbild und der Referenzfläche hergestellt und die Transformationsparameter berechnet werden (Lillesand et al. 2004). Diesen Vorgang nennt man *resampling*. Dabei haben sich drei verschiedene Methoden herauskristallisiert: die nächste Nachbarschaft, die bilineare Interpolation und die bikubische Interpolation (Albertz 2007). Im Zuge dieser Arbeit wird das Verfahren der nächsten Nachbarschaft gewählt, da nur hier die ursprünglichen Pixelwerte erhalten bleiben.

Atmosphärenkorrektur

Die Atmosphärenkorrektur beinhaltet Verfahren, die während der Datenaufnahme auftretende Störungen korrigiert. Hierbei werden Effekte reduziert, die nicht objektspezifisch sind, sondern die eigentlichen Objektinformationen in störender Weise systematisch überlagern (Albertz 2007). Wie bereits unter Punkt 3.1 gezeigt wurde, unterliegt die eintreffende Sonnenstrahlung auf ihrem Weg durch die Atmosphäre bis zur Erdoberfläche und wieder zurück zum Sensor unterschiedlichen Absorptions- und Streuprozessen, die je nach Wellenlänge und Zusammensetzung der Atmosphäre stark variieren. Dies kann zu Fehlern in den Helligkeitswerten der Satellitendaten führen (Bolle et al. 2006). Doch nicht nur der Strahlungsverlauf durch die Atmosphäre, sondern auch die unterschiedliche Aufnahmegeometrie zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme muss berücksichtigt werden, da Sonnenstand und Blickwinkelgeometrie die Szenenbeleuchtung beeinflussen (Lillesand et al. 2004). Ebenso ist hier das Geländere Relief zu berücksichtigen, dass je nach Sonneneinstrahlung andere Beleuchtungseffekte hervorruft. Dies kann bei multitemporalen Verfahren irrtümlicherweise eine Veränderung anzeigen (Blaschke et al. 2002).

Neben den multitemporalen Verfahren ist eine Atmosphärenkorrektur auch für auf Indices beruhende Methoden nötig. So fanden Leroy & Hauteceur 1999 Veränderungen von Vegetations-Indices im Bereich von 0,05 – 0,2 aufgrund von gerichteten Effekten der Polarisation und Richtungsabhängigkeit der Reflexion über dem afrikanischen Kontinent. Ebenfalls konnten Lübker & Schaab 2009 eine Verbesserung in der Qualität des Segmentierungsergebnisses feststellen, wenn eine Atmosphärenkorrektur durchgeführt wird.

3.2 Aktive Aufnahmesysteme

Der entscheidende Unterschied der aktiven Aufnahmesysteme zu den passiven liegt darin, dass zur Bilderzeugung aktiv elektromagnetische Wellen ausgesandt werden. Somit sind aktive Systeme nicht von den gegebenen Lichtverhältnissen abhängig. Ein weiterer Vorteil der Radarerkundung gegenüber optischen Systemen äußert sich dadurch, dass die Erdoberfläche bei nahezu allen Wetterverhältnissen aufgenommen werden kann, da die Mikrowellen leichten Regen und Schnee, Wolken, Nebel und Rauch durchdringen können (Albertz 2007). Die Unabhängigkeit von Witterungs- und Beleuchtungsverhältnissen garantiert eine zeitliche Kontinuität der Radaraufnahmen. Im Folgenden wird näher darauf eingegangen, wie die Bilderzeugung bei aktiven Systemen vonstatten geht. Da aktive Systeme in viel größeren Wellenlängen operieren (bis zu 2,500,000 mal größer) als passive Systeme, liefern sie generell andere Informationen über die Objekte der Erdoberfläche. Damit tragen sie zum besseren Verständnis unserer Umwelt bei (Lillesand et al. 2004).

3.2.1 Funktionsweise

Ein Radarsatellit sendet aktiv Mikrowellen aus einer Antenne aus, erzeugt die verwendete elektromagnetische Strahlung also selbst. Die elektromagnetischen Wellen werden im „*side looking*“ Verfahren (Seitensicht-Radar) ausgestrahlt und verbreiten sich kegelförmig von der Antenne (Albertz 2007). Diese treffen auf der Erdoberfläche auf ein Objekt und werden dadurch teilweise zur Antenne zurückreflektiert und dort registriert. Durch Unterschiede in Amplitude, Phase und Polarisation der Rückstreuprozesse (*backscatter*) wird ein Grauwertbild generiert (Nicolas & Adragna 2008). Diese Grauwerte spiegeln je nach Helligkeit die Intensität der Rückstreuung wieder (Lillesand et al. 2004). Die Auflösung eines Radarbildes ist von der Länge der Antenne abhängig. Um die Auflösung zu verbessern und auch von Satelliten aus zu ermöglichen, wird auf synthetische Apertur (*synthetic aperture radar*) (SAR) zurückgegriffen (Albertz 2007). Hierbei werden einzelne Geländepunkte während des Überfluges wiederholt bestrahlt. Sie tragen so mehrfach zu den empfangenen Reflexionssignalen bei und werden in komplexer Weise miteinander korreliert (Nicolas & Adragna 2008). Die Daten können bei der Verarbeitung jedoch so behandelt werden, als würden sie von einzelnen Elementen eines sehr langen Antennensystems stammen. Dadurch lassen sich Bilddaten mit hoher geometrischer Auflösung ableiten (Albertz 2007, Nicolas & Adagna 2008). Die Antenne fungiert dabei zugleich als Sender und Empfänger.

Durch die kegelförmige Ausbreitung des Radarstrahls auf die Erdoberfläche ergeben sich im Radarbild Verzerrungen zwischen der so genannten *near range* und *far range* (Lillesand et al. 2004). Abbildung 3-5 stellt diesen Zusammenhang dar. So werden Objekte, die sich in *far range* befinden, größer abgebildet als sie eigentlich sind (Albertz 2007).

Ebenfalls stellt Abbildung 3-5 die verschiedenen geometrischen Eigenschaften zwischen eintreffender Strahlung und der Erdoberfläche dar. Als Depressionswinkel bezeichnet man den Winkel zwischen der Horizontebene des Aufnahmesystems und dem Strahl zum beobachteten Objekt. Seine Ergänzung zu 90° heißt Beobachtungswinkel. Der Einfallswinkel wird als der Winkel definiert, der sich zwischen dem bestrahlten Objekt und der lokalen Vertikalen befindet (Lillesand et al. 2004, Albertz 2007, Nicolas & Adagna 2008). Der Depressionswinkel nimmt von *near range* zu *far range* immer mehr ab, wohingegen der Einfallswinkel immer größer wird (Floyd 1998). Da die Reflexion von Streuern mit zunehmendem Einfallswinkel abnimmt, erscheint ein Radarbild in *near range* heller als in *far range* (Lillesand et al. 2004).

Abbildung 3-5 berücksichtigt besondere Effekte, die in Radarbildern aufgrund der kegelförmigen Ausbreitung eines Radarstrahls auf der Erdoberfläche auftreten. Dazu zählen der Radarschatten, die Verkürzung (*foreshortening*), und die Überlagerung (*layover*) (Floyd 1998). Die Überlagerung stellt eine extreme Form der Verkürzung dar. Überlagerungsbereiche erscheinen in der Radaraufnahme stark aufgehellt. Da die Reflexionssignale entsprechend ihrer Laufzeit und Intensität in Bilddaten umgesetzt werden, erhält man bei

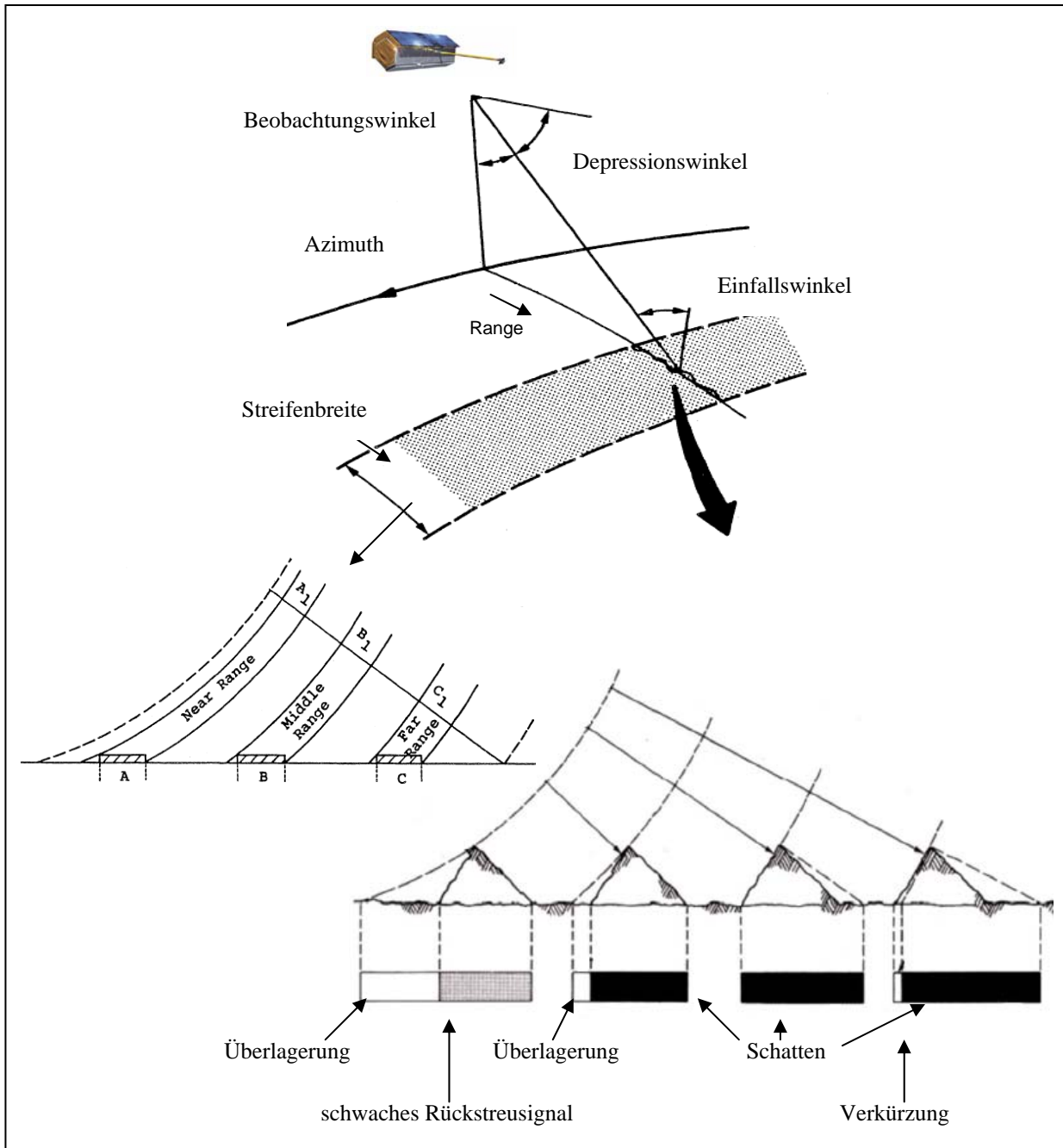


Abbildung 3-5: Aufnahmegeometrie von Radar-Systemen, eigene Darstellung nach Lillesand et al. 2004 und Floyd 1998

starkem Relief ein verzerrtes Bild. So erscheinen höher gelegene Geländepunkte als zum Radarsystem hin versetzt. Dadurch tritt bei zum Sensor orientierten Hängen eine Verkürzung auf. Ist der Depressionswinkel größer als die Hangneigung, geht die Verkürzung hingegen in eine Überlagerung über. Geländepunkte, die in der Bezugsebene liegen, werden grundrisstreu abgebildet (Albertz 2007). In Satellitenbildern mit unterschiedlich hohem Relief erscheinen Oberflächenformen, die der einfallenden Strahlung zugeneigt sind heller als dem Sensor abgewandte Bereiche (Lillesand et al. 2004). Mit zunehmender Entfernung zum Sensor nimmt der Einfallswinkel immer mehr zu, weswegen die Bestrahlung des Geländes flacher wird. Dies erhöht die Länge der Schattenflächen stetig.

Der ausgesandte Radarstrahl wird hauptsächlich durch die zwei Faktoren Wellenlänge und Polarisation beeinflusst. Tabelle 3-2 zeigt die verschiedenen Bänder mit den dazugehörigen Wellenlängen, in denen aktive Systeme operieren.

Band	Wellenlänge in Zentimeter
K_a	0,75 – 1,10
K	1,10 – 1,67
K_u	1,67 – 2,40
X	2,40 – 3,75
C	3,75 – 7,50
S	7,50 – 15,0
L	15,0 – 30,0
P	30,0 – 100,0

Tabelle 3-2: Bänder von Radar-Satelliten, verändert nach Lillesand et al. 2004

Die Bandbezeichnung stammt aus den Anfangszeiten des Radars aus dem Militär und kann, je nach Behörde, etwas variieren. In welcher Wellenlänge ein Radarsatellit ausstrahlt ist wichtig, da sich dies einerseits auf die Eindringtiefe und Signaldämpfung (Extinktion) und andererseits auf den Streumechanismus an der Oberfläche auswirkt (Lillesand et al. 2004). Abbildung 3-6 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und der sich damit ergebenden Interaktion zwischen Vegetation und Boden. Ist die Oberflächenrauigkeit im Vergleich zur Wellenlänge der Strahlung gering, werden die Mikrowellen gespiegelt. Dies zeigt sich zum Beispiel an glatten Wasseroberflächen, die im Satellitenbild als dunkle Bereiche erscheinen (Abbildung 3-6 (c)). Liegt die Rauigkeit dagegen in der Größenordnung der Wellenlänge, wirkt die Fläche als diffuser Reflektor, und je nach Wellenlänge und Eindringtiefe der Mikrowellen erscheinen diese Bereiche unterschiedlich hell (Abbildung 3-6 (b)) (Albertz 2007). Mikrowellen werden nicht nur von Objekten an der Oberfläche reflektiert (Oberflächenstreuung), sondern können diese auch durchdringen. Dabei kommt es zu einer diffusen Streuung, die als Volumenstreuung bezeichnet wird und von der Oberflächenstreuung unterschieden werden muss (Floyd 1998) (Abbildung 3-6 (a)). Großen Einfluss auf das Reflexionsverhalten der Oberflächen hat ihre dielektrische Eigenschaft. So reflektieren Materialien mit hoher Dielektrizitätskonstante (zum Beispiel feuchte Böden) stark, und die Strahlung dringt nur wenig in das Material ein. Je mehr die Feuchte im Boden abnimmt, umso geringer wird auch das Reflexionsvermögen, die Eindringtiefe nimmt jedoch zu. Da das Reflexionssignal von der Dichte der Oberflächenschicht abhängt, vermag es Informationen zu vermitteln, die beispielsweise mit optischen Sensoren nicht erfassbar sind (Albertz 2007). Je nach Wellenlänge können die Radarstrahlen unterschiedlich tief in die

Vegetation oder den Boden eindringen. Kurzwellige X-Band Aufnahmen beschreiben vornehmlich die Oberflächenbeschaffenheit der erfassten Objekte, wohingegen langwellige L- oder P-Band Strahlen stärker in das bestrahlte Medium eindringen können und die Rückstreuung aus tieferen Schichten zunimmt (siehe Abbildung 3-6 (a)) (Lillesand et al. 2004).

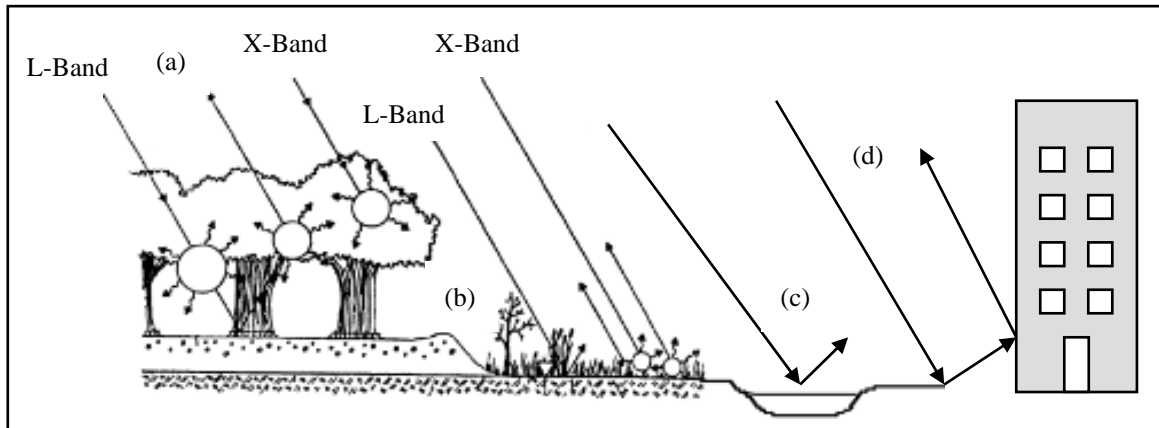


Abbildung 3-6: Radar-Rückstreueigenschaften, eigene Darstellung nach Floyd 1998 und Albertz 2007

Eine hohe Reflexion tritt an metallischen Strukturen auf (Albertz 2007). Spiegelt sich der Radarstrahl zweimal, wird die Mikrowellenstrahlung genau in Richtung des Sensors zurückreflektiert, wodurch ein heller, überstrahlter Fleck im Radarbild entsteht (*double-bounce-effect*). So erscheinen zum Beispiel städtische Bereiche in Radarbildern sehr hell, was ebenfalls in Abbildung 3-6 (d) dargestellt wird (Albertz 2007).

Der zweite Faktor, der die Mikrowellenstrahlung maßgeblich bestimmt, ist die Polarisation. Das ausgesandte Signal kann dabei so gefiltert werden, dass die elektromagnetische Welle nur in einer ausgezeichneten Richtung schwingt (Lillesand et al. 2004). Ein Radarsignal kann in horizontaler oder vertikaler Ebene ausgestrahlt und auch empfangen werden. Daraus ergeben sich vier mögliche Polarisationen, nämlich HH, VV, HV, oder VH. Die Objekte der Erdoberfläche reagieren je nach Ausrichtung und Größe unterschiedlich auf die auftreffenden Mikrowellenstrahlen. Weist ein Mikrowellenstrahl die gleiche Richtungskomponente auf wie der Streuer ist die Intensität des Radarechos besonders hoch. So reagieren horizontal ausgestrahlte Wellen mehr sensitiv auf horizontale Objekte, und vertikal ausgestrahlte Wellen mehr sensitiv auf vertikale Objekte (Tanase et al. 2010). Außerdem besteht die Möglichkeit, dass bestimmte Materialien an der Erdoberfläche die Strahlung mehr oder weniger stark depolarisieren, wodurch zusätzliche Objektinformationen vermittelt werden (Albertz 2007).

Eine weitere Besonderheit in Radardaten ist der so genannte *speckle*-Effekt. Dies ist eine feinkörnige Bildstruktur, die ihre physikalische Ursache in Interferenzerscheinungen hat. Sie wirkt bei der Bildinterpretation und rechnerischen Auswertung als störender Faktor. Diese Überlagerung der Mikrowellenstrahlung kommt durch verschiedene individuelle Streuer

innerhalb eines Bildelements zustande. Die Anordnung und Ausrichtung der Objekte innerhalb eines Bildpunktes und auch zu benachbarten Zellen ist unterschiedlich. Deswegen wird das eintreffende Radarsignal von jedem Objekt mit einer leicht unterschiedlichen Phase zurückgeworfen. Dies führt dazu, dass benachbarte Zellen, die visuell sehr ähnlich sind, ein anderes Rückstreusignal aufweisen können. Dadurch erscheinen eigentlich homogene Flächen körnig und inhomogen (Floyd 1998). Um den *speckle*-Effekt so gut wie möglich zu reduzieren, werden verschiedene Filtermethoden eingesetzt, denen eine Modellierung des *speckle*-Rauschens zugrunde liegt. Meist wird von einem multiplikativen Modell oder einer Gauss'schen beziehungsweise Gamma-Verteilung des *speckle* ausgegangen (Albertz 2007). Näheres dazu siehe unter Punkt 3.2.4 und 4.2.1.

3.2.2 Vergleich von Radarsatelliten zur Brandflächendetektion

SAR Sensoren können das Rückstreusignal von Brandflächen auf der Basis ihrer Größe, Form, Rauigkeit, dielektrischen Eigenschaft, Einfallswinkel und Topographie messen (Gimeno & Ayanz 2004 [a]). Das Rückstreusignal kann jedoch je nach Einfallswinkel und Geländeausrichtung stark variieren (Tanase et al. 2010, Gimeno & Ayanz 2004 [a], French et al. 1999). Das Rückstreusignal setzt sich aufgrund der unter 3.2.1 genannten Eigenschaften und je nach Einfallswinkel und Geländeausrichtung komplex zusammen. Daher ist es schwierig Aussagen über die Veränderung des Rückstreusignals über Brandflächen zu treffen. Es kann sowohl zu einem Anstieg als auch zu einem Rückgang des Rückstreusignals kommen (Tanase et al. 2010, Nakayama & Siegert 2001).

Ähnlich zu den passiven Systemen werden auch bei den aktiven Systemen einige Satelliten, die bereits zur Brandflächendetektion verwendet wurden angeführt. Tabelle 3-3 beschreibt ihre Eigenschaften und zeigt auf, welcher Autor in welchem Gebiet bereits einen Brand mit Hilfe aktiver Systeme detektiert hat. Ebenfalls wird beschrieben, ob das Rückstreusignal in diesen Fällen zu- oder abgenommen hat. Die meisten Studien zur Brandflächendetektion mit Mikrowellen sind im borealen Nadelwald durchgeführt worden (siehe Tabelle 3-3). Ausnahmen dazu stellen Gimeno et al. 2004 [a und b], Tanase et al. 2010, Siegert & Rücker 2000 und Menges et al. 2004 dar, die Brandflächen im mediterranen Bereich, im tropischen Regenwald und in Australien untersucht haben. Die meisten Autoren konnten einen Anstieg des Radarrückstrahls über einer Brandfläche feststellen. Im borealen Nadelwald liegt dies am Abschmelzen des Permafrosts, was Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften des Bodens bedingt. Dies führt zu vermehrter Rückstreuung (Kasischke et al. 1992). Tanase et al. 2010 beobachtete bei TerraSAR-X Daten ebenfalls einen Anstieg über Brandflächen, konnte je nach Einfallswinkel, Geländeausrichtung und Polarisation jedoch auch eine Abnahme erkennen. Wie bereits unter Punkt 3.2.1 gezeigt wurde, ist das X-Band vor allem für die Oberflächenstreuung sensitiv. Brennt die Vegetation ab, kommt es zu einer vermehrten Interaktion zwischen den übrig bleibenden Baumstämmen und dem blankem Boden, was zusätzlich mit der Veränderung der Dielektrizitätskonstante des Bodens zu einem Anstieg des Rückstreusignals führt (Tanase et al. 2010). Bei L-Band-Daten kann der Radarstrahl nach

einem Brand tiefer in den trockenen Boden eindringen, was zu einem Rückgang des Rückstreusignals führen kann. Für Studien über einen längeren Zeitraum sind die Wetterbedingungen ausschlaggebend. Regen oder Feuchte beeinflussen das Rückstreusignal stark, was zu unterschiedlichen Rückstreuwerten über ein und derselben Brandfläche führen kann (Nakayama & Siegert 2001, Tanase et al. 2010).

Satellit	Band	Polarisation	Räumliche Auflösung	Autor	Region	Veränderung des Rückstreusignals
ERS 1&2	C	VV	25 Meter	Siebert & Rücker 2000	Tropischer Regenwald	Rückgang
				Gimeno et al. 2004 [b]	Mediterraner Raum	Anstieg
				Ranson et al. 2001	Borealer Nadelwald	Anstieg
				Kaschke et al. 1992	Borealer Nadelwald	Anstieg
				Bourgeau-Chavez et al. 1995	Borealer Nadelwald	Anstieg
				Karszenbaum et al. 2003	Argentinien	Anstieg
Radarsat1	C	HH	28 Meter	Gimeno & Ayanz 2004 [a]	Mediterraner Raum	Anstieg
				Ranson et al. 2001	Borealer Nadelwald	Kaum Veränderung
				French et al. 1999	Borealer Nadelwald	Anstieg
JERS-1	L	HH	30 Meter	Nakayama & Siebert 2001	Tropischer Regenwald	Rückgang
				Ranson et al. 2001	Borealer Nadelwald	Kaum Veränderung
TOPSAR (airborne)	L & P	VV, HH, VH, HV	je nach Flughöhe	Menges et al. 2004	Australien	Anstieg / Rückgang
TerraSAR-X	X	VV, HH, VH, HV	siehe Punkt 3.2.3	Tanase et al. 2010	Mediterraner Raum	Anstieg (HH) Rückgang (HV)

Tabelle 3-3: Stand der Forschung Radar-Brandflächendetektion

3.2.3 TerraSAR-X

Der TerraSAR-X Satellit ist am 15. Juni 2007 gestartet und seit Anfang 2008 im operationellen Dienst tätig. Eine Besonderheit dieses Satelliten liegt darin, dass er in einem *public private partnership* zwischen Forschung und Industrie finanziert wurde, und somit sowohl kommerzielle Benutzer, als auch die Wissenschaft auf TerraSAR-X Satellitenbilder zurückgreifen können (Buckreuss & Schättler 2010).

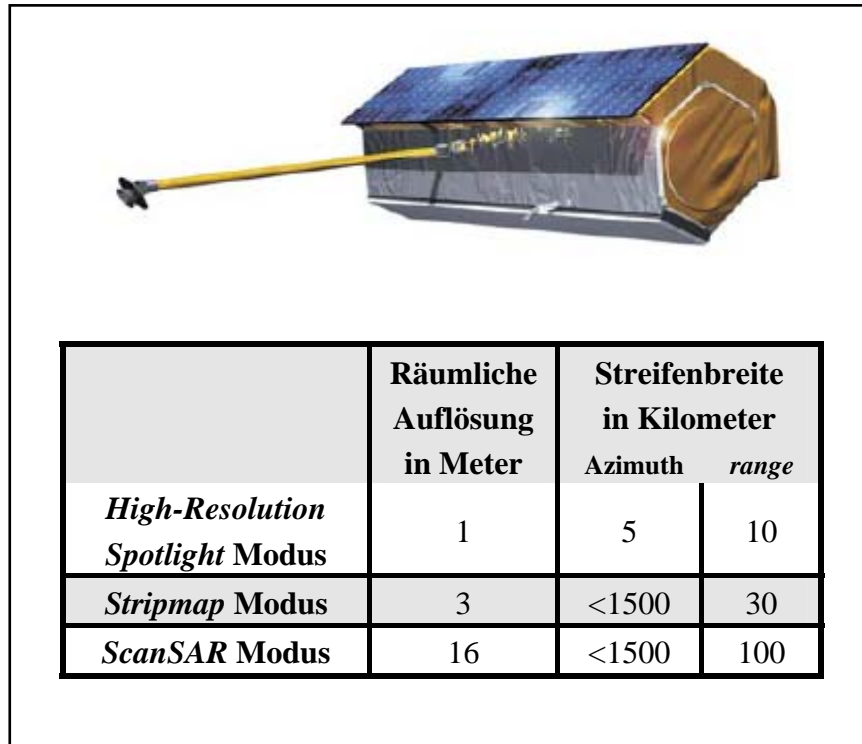


Abbildung 3-7: Der TerraSAR-X Satellit mit verschiedenen Aufnahmemodi, verändert nach Roth et al. 2002

Abbildung 3-7 zeigt eine Aufnahme des TerraSAR-X Satelliten. Der Satellit wiegt 1.230 Kilo und verfügt über eine 4,8 Meter lange Antenne. Diese kann Mikrowellen in H- und V-Polarisation sowohl aussenden, als auch empfangen (Pitz & Miller 2010). Der Satellit operiert in 514 Kilometer Höhe in einem nahezu polaren und sonnensynchronen Orbit, was die Energieversorgung mit Hilfe eines Solargenerators garantiert. TerraSAR-X nimmt die Erde streifenweise auf, bis er nach elf Tagen eine Umrundung geschafft hat (DLR 2009). Da er über eine schwenkbare Antenne und somit unterschiedliche Beobachtungswinkel verfügt, kann jeder Punkt der Erde innerhalb von zwei bis vier Tagen aufgenommen werden (Pitz & Miller 2010).

Zusätzlich zur Schwenkbarkeit ermöglicht es die Antenne zwischen unterschiedlichen Aufnahmemodi zu wechseln, nämlich *Spotlight*, *Stripmap* und *ScanSAR* (Pitz & Miller

2010). Abbildung 3-7 gibt nähere Informationen zu den einzelnen Aufnahmemodi. Im *Spotlight*-Modus wird die Erdoberfläche länger mit dem Radarstrahl bestrahlt, was zu einer höheren Auflösung, jedoch geringeren Streifenbreite führt. Je größer die Streifenbreite wird, umso geringer wird die räumliche Auflösung.

Die Satellitenbilder können in verschiedenen Produktphasen, je nach gegebener Aufgabenstellung oder gewünschtem Prozessierungsgrad bestellt werden (Roth et al. 2002). Das Rohprodukt ist das *single look slant range complex* (SSC) des fokussierten Radar Signals, das alle spektralen und Phaseninformationen enthält. Aus diesem Format können alle anderen Produkte erzeugt werden.

Das Produkt in der darauf folgenden Prozessierungsstufe ist das *multi look ground range detected* (MGD) Format. In diesem Bild wird eine *speckle*-Reduktion vorgenommen, und quadratische Bildpunkte werden generiert.

Darauf folgt als nächstes Produkt das *geocoded ellipsoid corrected* (GEC) Format. Dabei handelt es sich um ein im *multi-looking* (siehe Punkt 3.2.4.) aufgenommenes Produkt, das bereits in UTM oder WGS84 projiziert wurde und über äquidistante Bildpunkte verfügt.

Das letzte Produkt in der Prozessierungskette ist das *enhanced ellipsoid corrected* (EEC) Format. Dabei handelt es sich ebenfalls um ein im *multi-looking* Verfahren aufgenommenes Produkt. Es ist zu UTM, UPS oder WGS84 projiziert und *resampled*, und verfügt über äquidistante Bildpunkte. Ebenfalls sind durch das Gelände hervorgerufene Verzerrungen bereits korrigiert (Roth et al. 2002).

Um eine optimale Vorprozessierung zu erhalten, werden im Zuge dieser Arbeit TerraSAR-X Daten im SSC-Format verwendet.

3.2.4 Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden

Hier werden redundant zu den optischen Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden nur die Verfahren kurz erläutert, die in der Radardaten Vorverarbeitung dieser Arbeit Verwendung finden.

Geometrische Kalibrierung

Nach Loew 2006 kann ein ausgeprägtes Relief Veränderungen im Rückstrahlsignal von bis zu +/- 5 dB bewirken. Um reliefbedingte Verzerrungen zu beseitigen, ist deswegen auch bei Radarbildern eine geometrische Korrektur der Daten nötig. Näheres dazu siehe unter Punkt 4.2.2.

Multitemporale Verfahren

Für die Radar-Daten gelten in diesem Punkt die gleichen Bedingungen wie für die optischen Daten. Deswegen sei der Leser hier an Punkt 3.1.4 verwiesen.

Radiometrische Kalibrierung

Um einen quantitativen Vergleich des Rückstreuverhaltens zwischen verschiedenen Auflösungszellen eines Radarbildes, aber auch eine Gegenüberstellung von SAR-Aufnahmen unterschiedlicher Sensoren, Aufnahmemethoden, verschiedener Aufnahmezeitpunkte, oder durch verschiedene Prozessoren aufgezeichnete Daten zu ermöglichen, ist es nötig eine radiometrische Kalibrierung durchzuführen (SARMAP 2009). Punkt 3.2.4 geht näher darauf ein, wie die radiometrische Kalibrierung und geometrische Korrektur in dieser Arbeit durchgeführt wurde.

Speckle-Reduktion

Das Zustandekommen des *speckle*-Effekts in Radarbildern wurde bereits unter Punkt 3.2.1 näher erläutert. Ein sehr wichtiger Vorverarbeitungsschritt bei Radardaten stellt somit die Reduktion des *speckle*-Effekts dar, da er weitere Bildverarbeitungsschritte wie die Segmentierung oder die Klassifikation maßgeblich beeinflusst (Vidal-Pantaleoni & Marti 2004). Hierbei wird angestrebt, die körnige Struktur der Radardaten in gleichförmigen Flächen zu verringern, wobei jedoch die Bildstrukturen und –kanten erhalten bleiben sollen. Um diese widersprüchlichen Anforderungen erfüllen zu können, muss in der Praxis ein Kompromiss zwischen Beiden gefunden werden (Albertz 2007). Um den *speckle* reduzieren zu können gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Gebräuchlichsten seien an dieser Stelle kurz erwähnt.

Das *multilooking* Verfahren fasst die Rückstreubeiträge der einzelnen *looks* einer Aufnahme zusammen, um den Effekt des zufallsverteilten Bildrauschens zu kompensieren. Der Betrag der *speckle*-Reduzierung ist umso größer, je größer die Anzahl der *looks*. Der Nachteil dieser Methode besteht jedoch darin, dass mit steigender Anzahl an *looks* ein Verlust in der räumlichen Auflösung einhergeht (Lillesand et al. 2004, SARMAP 2009). Da es ein Ziel dieser Arbeit ist, die Brandflächen so genau wie möglich zu detektieren, wurde dieses Verfahren nicht verwendet.

Liegen von einem Gebiet mehrere Satellitenbilder vor, kann auch in der zeitlichen Domäne gefiltert werden. Dabei wird die Rückstreuung mehrerer Bilder berücksichtigt und somit der Rauschanteil des Bildes herausgefiltert. Diese multitemporale, auch *multi-channel* genannte Variante der *speckle*-Reduzierung verbessert die radiometrische Auflösung, ohne die räumliche Auflösung entscheidend zu beeinträchtigen (Bruniquel & Lopes 1997). Da jedoch mehrere Satellitenbildszenen der Waldbrände nicht zur Verfügung stehen, kann dieses Verfahren nicht angewendet werden.

Ein anderes Verfahren der *peckle*-Reduktion stellen *wavelet* basierte Filtermethoden (Gupta & Gupta 2007) und die *TV-Segmentation* (Sveinsson et al. 2009) dar, auf die im Zuge dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen wird.

Ein gebräuchliches Verfahren zur Minimierung des *speckle*-Effekts sind adaptive Filter, die mit Hilfe eines wandernden Fensters (Koeffizientenmatrix) von vordefinierter Größe das Bild glätten. Dabei wird jeweils für das zentrale Bildelement ein korrigierter Intensitätswert auf Basis einer mathematischen Operation berechnet, was zu einer räumlichen Mittelung der Reflexionswerte führt (Esch 2006). Die adaptiven Filter können wiederum in zwei Gruppen aufgeteilt werden, die Hochpassfilter und die Tiefpassfilter. Die Hochpassfilter betonen die eng benachbarten Grauwertunterschiede, während die Tiefpassfilter genau die entgegengesetzte Wirkung aufweisen und die langperiodischen Grauwertunterschiede hervorheben. Dies ergibt eine glättende Wirkung, durch die Rauscheffekte unterdrückt werden, aber auch Bildinformation verloren geht (Albertz 2007). Die Tiefpassfilter finden besondere Anwendung im Mikrowellenbereich. Hierfür stehen zahlreiche verschiedene Filter zur Auswahl, die in unterschiedlich komplexer Weise versuchen, das Bildrauschen zu berechnen. Näheres zu diesen verschiedenen Filtern und welcher Filter für die TerraSAR-X Satellitenbildszenen ausgewählt wird, wird unter Punkt 4.2.1 beschrieben. Bei gegebener Datengrundlage versprechen Tiefpassfilter das beste Klassifikationsergebnis und werden somit auch im Zuge dieser Arbeit verwendet.

In diesem Kapitel ist die Funktionsweise sowohl von passiven als auch von aktiven Aufnahmesystemen näher erläutert worden. Verwendete Sensoren und Methoden zur Brandflächendetektion in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wurden dargestellt. Die in dieser Arbeit zur Brandflächendetektion verwendeten Satelliten SPOT 5 und TerraSAR-X wurden näher beschrieben, und die nötigen Vorverarbeitungs- und Auswertemethoden wurden erklärt. Das nächste Kapitel geht darauf ein, wie die Datenvorverarbeitung an den ausgewählten Daten durchgeführt wird.

4. Datenvorverarbeitung

Nachdem in Kapitel 3 sowohl ein Überblick über passive als auch aktive Verfahren der Fernerkundung zur Brandflächendetektion gegeben worden ist, befasst sich das Kapitel 4 mit der notwendigen Vorverarbeitung der Daten. Das Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, das unter Kapitel 1 beschriebene *Fire-Tool* des ZKI hinsichtlich einer multitemporalen Analyse sowohl mit optischen als auch mit Radar-Daten zu erweitern. Dieses Verfahren bedingt eine adäquate Vorverarbeitung der Satellitenbilddaten.

Im Folgenden wird die Datenvorverarbeitung sowohl der optischen Daten als auch der Radar-Daten näher erläutert.

4.1 Vorverarbeitung der optischen Daten

Die durch das ZKI durchgeführte Schnellkartierung des Waldbrandes von La Palma, und erste Versuche der Brandflächendetektion im Zuge dieser Diplomarbeit haben gezeigt, dass die einer Brandfläche ähnliche spektrale Beschaffenheit des Lavagesteins auf La Palma (siehe Punkt 2.3.2) bei monotemporalen Daten zu großen Ungenauigkeiten in der Feuerflächenermittlung führt. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer Entwicklung eines multitemporalen Verfahrens. Für multitemporale Analysen ist eine genaue geometrische Übereinstimmung, und damit eine geometrische Korrektur der vorliegenden Satellitenbilddaten notwendig. Wie bereits unter Punkt 3.1.4 dargelegt wurde, ist sowohl für Indices, als auch für eine multitemporale Brandflächendetektion eine Bereinigung der Satellitendaten von Einflüssen der Atmosphäre und verschiedenen Beleuchtungszeitpunkten von großer Wichtigkeit, da sonst vermehrt Fehlklassifikationen auftreten können (Ross & Elvidge 1999). Um ein optimales Klassifikationsergebnis erzielen zu können, wird somit sowohl für die Satellitenbilder von La Palma, als auch für das Satellitenbild von der Region Grammatiko in Griechenland eine adäquate Datenvorverarbeitung durchgeführt, die eine geometrische und atmosphärische Korrektur beinhaltet.

Die exakte Vorgehensweise der Datenvorverarbeitung der SPOT 5 Satellitenbilder wird im Folgenden genauer erläutert.

4.1.1 Geometrische Korrektur

Für die Waldbrände in La Palma 2009 liegen zwei SPOT 5 Satellitenbilddaufnahmen vor. Eine pre-Szene vom 30.07.2007 und eine Aufnahme während des Waldbrandes vom 07.08.2009. Die beiden Szenen weisen jedoch einen erheblichen räumlichen Versatz von bis zu 13 Pixel auf. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen gleichmäßigen Versatz. Je nach Bereich im Satellitenbild (Ostküste, Westküste, Gebirge) variierten die Pixelverschiebungen sowohl in x- als auch in y-Richtung. Dieser starke Pixelversatz ist für eine sinnvolle Veränderungsanalyse

nicht zu tolerieren, da sonst in vielen Gebieten irrtümlich eine Veränderung angezeigt werden würde. Um diesem Umstand Abhilfe zu schaffen, werden die beiden SPOT 5 Bilder mit Hilfe des in der *Software ERDAS* implementierten *image correction tool* auf das höher aufgelöste und bereits orthorektifizierte TerraSAR-X Bild vom 09.08.2009 georeferenziert. Um eine optimale Anpassung der beiden Satellitenbilder an das TerraSAR-X Bild zu gewährleisten, werden 40 in allen drei Satellitenbildern eindeutig identifizierbare Passpunkte gewählt, welche gleichmäßig über die Satellitenbildszenen verteilt sind. Mit Hilfe dieser identischen Passpunkte kann eine geometrische Beziehung zwischen den Szenen hergestellt und die Transformationsparameter berechnet werden (Albertz 2007). La Palma verfügt über ein sehr starkes Relief, das sich in weniger als 10 Kilometer Luftlinie von Meeresniveau auf über 2.400 Meter erstreckt. Im Bereich der Brandfläche steigt das Relief in circa vier Kilometern um 1850 Meter an. Diese Geländeenergie wirkt sich mit starken Verzerrungen auf das Satellitenbild aus, was die Festlegung geeigneter Passpunkte erschwert. Das *image correction tool* bietet die Möglichkeit die Sensorgeometrie des SPOT 5 Satelliten und ein Geländemodell zu berücksichtigen (Erdas, Inc. 2009). Zum Orthorektifizieren beider SPOT 5 Szenen wird ein Geländemodell mit einer Auflösung von 30 Meter verwendet (siehe Punkt 2.2.2). Die Sensorgeometrie wird aus den Metadaten abgelesen. Das bereits erwähnte sehr steile und zerklüftete Relief führt im Satellitenbild vom 30.07.2007 zu einem RMS (*root mean square*) Fehler von 8,74 und in dem Satellitenbild vom 07.08.2009 zu einem RMS Fehler von 28,08. Der RMS Fehler ist die Differenz zwischen der gewünschten Koordinatenlage des neuen Pixels und der aktuellen Koordinatenlage. Dieser Pixelversatz wird mit Hilfe der durch die gesuchten Passpunkte bestimmten Transformationsgleichung errechnet und drückt somit den Abstand des neu errechneten Pixels zum Referenzpixel aus. Da das SPOT 5 Bild auf eine räumlich höher aufgelöste Satellitenbildszenen georeferenziert wird, und der RMS Fehler in diesem Fall die Lage des SPOT 5 Bildes zum Referenzpixel angibt, wird ein RMS Fehler von 28 als ausreichend angenommen. Zudem muss die Reliefenergie berücksichtigt werden. Die visuelle Kontrolle der neu referenzierten SPOT 5 Satellitenbildszenen ergibt (vor allem im Bereich der Brandfläche) eine weitaus höhere Übereinstimmung der Satellitenbildszenen als vor der Georeferenzierung.

Das Umrechnen mit Hilfe der durch die Passpunkte bestimmten Transformationsgleichung nennt man *resampling*. Es gibt drei verschiedene Methoden: das Verfahren der nächsten Nachbarschaft, die bilineare Interpolation und die bikubische Interpolation. Bei den beiden letztgenannten Verfahren berechnet sich der Grauwert eines Pixels im neuen Bild aus einer Interpolation der benachbarten Grauwerte und ändert somit seinen ursprünglichen Wert (Albertz 2007). Im Zuge der Übertragbarkeit dieser Methode und einer späteren Veränderungsanalyse scheiden die beiden letztgenannten Verfahren aus (Lillesand et al. 2004). Somit wird die nächste Nachbarschaft als Interpolation verwendet.

4.1.2 Atmosphärenkorrektur

Grundsätzlich kann man zwei verschiedene Verfahren der atmosphärischen Korrektur unterscheiden, nämlich die relative radiometrische Korrektur und die absolute radiometrische Korrektur. Beide Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

4.1.2.1 Relative radiometrische Korrektur

Bei der relativen radiometrischen Korrektur wird ein Referenzbild radiometrisch an ein Zielbild mittels linearer Transformation angepasst (Schröder et al. 2006). Dieses empirische Verfahren wird häufig auch relative radiometrische Normalisierung genannt und kann eine Vielzahl verschiedener Verfahren beinhalten, um so genannte Pseudo-Invariante Objekte herauszufinden, anhand derer die lineare Transformation durchgeführt werden kann (Schröder et al. 2006). Die Reflexion von (in mehreren Szenen) unveränderlichen Objekten kann dazu genutzt werden, um die Szenen so erscheinen zu lassen, also ob sie mit dem gleichen Sensor, der gleichen Kalibrierung und den gleichen atmosphärischen Bedingungen aufgenommen worden sind. Generell sind relative Normalisierungsverfahren einfacher durchführbar als absolute (Chen et al. 2005). Eine relative Radiometrische Korrektur berücksichtigt jedoch weder die störenden Einflüsse der Atmosphäre, noch die Umgebungsstrahlung (Einwirkung des Geländes), und wird daher zur Vorverarbeitung der Daten nicht als ausreichend betrachtet.

4.1.2.2 Absolute radiometrische Korrektur

Die relative radiometrische Korrektur unterscheidet sich gravierend von der absoluten radiometrischen Korrektur. Deren Ziel ist es die absolute Reflexion von Objekten zu extrahieren, also die Störfaktoren der Atmosphäre, die Umgebungsstrahlung und die Sensorkalibrierung herauszurechnen (Chen et al. 2005). Um dies zu gewährleisten, werden in einem ersten Schritt die Grauwerte (*digital numbers*) anhand sensoreigener Kalibrierungsparameter in absolute Radianzen umgerechnet (siehe Gleichung 4.1) (Lillesand et al. 2004). Die Kalibrierungsparameter (*gain* und *offset*, beziehungsweise *bias*) können aus den Metadaten des jeweiligen Sensors abgelesen werden.

$$L_{sat} = DN * Gain + Offset \quad 4.1$$

Mit:

L_{sat}	=	vom Sensor aufgezeichnete spektrale Radianz
DN	=	Grauwert
Gain & Offset	=	sensor-spezifische Kalibrierungsparameter

Diese Methode bereinigt Aufnahmefehler des Sensors und ist zeitlich wenig aufwendig. Berücksichtigt werden jedoch weder topographische noch atmosphärische Effekte. Da sich

beide Faktoren in den Satellitenbildszenen von La Palma stark auswirken, wird eine Umwandlung der Grauwerte in Radianzen nach einer Überprüfung der Rückstrahlung in den beiden Satellitenbildszenen nicht als ausreichend angesehen, und deswegen eine komplette absolute radiometrische Korrektur durchgeführt. So wird in einem zweiten Schritt die am Sensor aufgenommene Strahlung in einen Oberflächenreflektionskoeffizient (*ground surface reflectance*) umgewandelt (siehe Gleichung 4.2) (Lillesand et al. 2004, Richter 2010). Wie bereits unter Punkt 3.1 gezeigt wurde, wird die Variation der solaren Einstrahlung durch atmosphärische Effekte hervorgerufen. So schwächt die Atmosphäre einerseits die solare Strahlung durch Streu- und Absorptionsprozesse ab, andererseits erzeugt sie durch Rückstreuung eine Hintergrundstrahlung (*path radiance*) im Sensor. Dies stellt die Grundgleichung für jede Atmosphärenkorrektur dar (siehe Gleichung 4.2).

$$L_{tot} = \frac{\rho ET}{\pi} + L_p \quad 4.2$$

Mit:

L_{tot}	=	totale spektrale Radianz, die der Sensor misst
ρ	=	Rückstreuung des Objekts
E	=	Bestrahlung auf das Objekt
T	=	Durchlässigkeit der Atmosphäre
L_p	=	Hintergrundstrahlung

Um die störenden atmosphärischen Einflüsse aus den Satellitenbildern herauszurechnen, und eine absolute radiometrische Korrektur durchzuführen, wird in dieser Arbeit das Programm *Atcor3* verwendet. Im Folgenden soll auf die Umsetzung der absoluten radiometrischen Korrektur mit Hilfe der *Software Atcor3* eingegangen werden. Diese *Software* wird gewählt, da sie laut Neubert 2006 das einzig verfügbare Tool darstellt um eine interaktive atmosphärische Korrektur mit hoch auflösenden Satellitenbildszenen durchzuführen. Um den störenden atmosphärischen Einflüssen entgegenzuwirken, benötigt die *Software* Eingabeparameter, die entweder aus den Metadaten entnommen werden können, oder die sich mithilfe des im Programm implementierten *SPECTRA* Moduls aus dem Satellitenbild extrahieren lassen (Richter 2010). *Atcor3* berücksichtigt sowohl die Geometrie des Sensors als auch die der Sonne. Die Sensorgeometrie wird durch den Neigungswinkel des Sensors „*sensor tilt angle*“ und den Sensorazimutwinkel „*satellite azimuth angle*“ bestimmt. Die Geometrie der Sonne wird durch den Sonnenzenitwinkel „*solar zenith*“ und den Sonnenazimutwinkel „*solar azimuth*“ berücksichtigt (Richter 2010). Diese Winkel werden je nach Sensor unterschiedlich berechnet, da jede Vertreiberfirma die Metadaten verschieden ausliefert. Ebenfalls muss die Bandkombination des Eingabesatellitenbildes der vorgeschriebenen Reihenfolge von *Atcor3* folgen. Für die genaue Berechnung der Geometrie

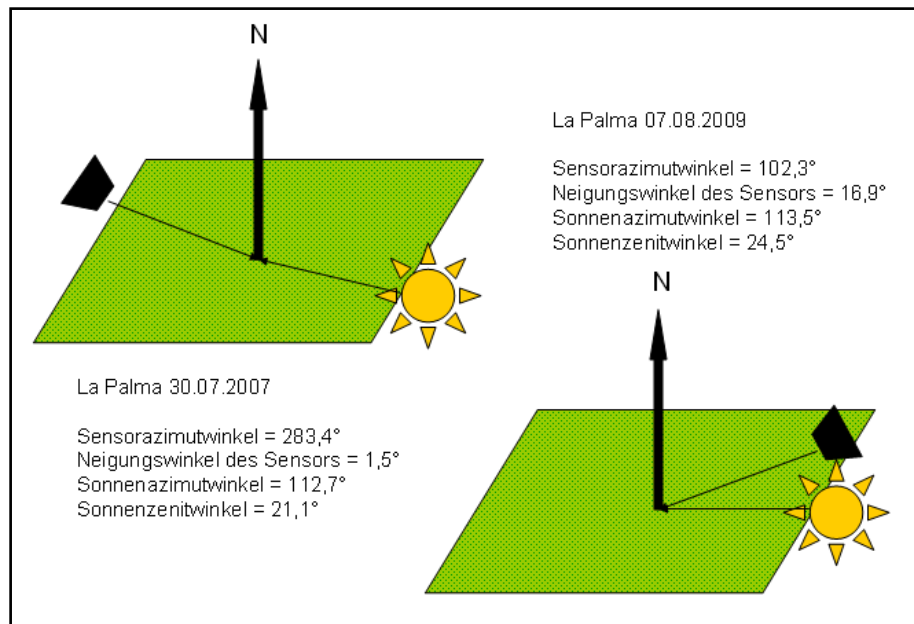


Abbildung 4-1: Sensorgeometrie La Palmas, eigene Darstellung

sei der Leser auf Richter 2010 verwiesen. Abbildung 4-1 verdeutlicht schematisch die stark unterschiedliche Aufnahmegeometrie der beiden SPOT 5 Satellitenbildszenen von La Palma, was die Notwendigkeit einer Atmosphärenkorrektur noch einmal hervorhebt. Die Sonne steht bei beiden Aufnahmen relativ gleich, jedoch befindet sich der Sensor der Satellitenbildaufnahme vom 30.07.2007 gegenüber von der Sonne, was bewirkt, dass dieses Bild heller erscheint als die Satellitenbildaufnahme vom 07.08.2009.

Orthographische Effekte werden in *Atcor3* ebenfalls berücksichtigt. Ein starkes Relief ruft unterschiedliche Beleuchtungs- und Beschattungseffekte innerhalb einer Satellitenbildszenen hervor. Eine topographische Normalisierung ist wichtig, da sich der Einfluss des Geländes vom Satellitenbild auf die Charakteristik der Bildobjekte und somit die Segmentierung überträgt. Um eine gute Segmentierung, und damit ein gutes Klassifikationsergebnis erhalten zu können, sollte ein Satellitenbild orthographisch korrigiert werden (Lübker & Schaab 2009). Ziel dieser so genannten topographischen Normalisierung ist es die Hangneigungs- und Hangausrichtungseffekte zu minimieren (Richter 2010). Hierbei wird ein Geländemodell benötigt, das sowohl von der Auflösung als auch von den räumlichen Ausmaßen mit den Satellitenbildszenen übereinstimmt. In diesem Fall wird ein Geländemodell mit 30 Meter Auflösung verwendet, das an die besser aufgelösten Spot 5 Szenen angepasst wird (siehe Punkt 2.2.2). *Atcor3* berechnet aus dem digitalen Geländemodell selbständig die Hangneigung (*slope*) und die Hangausrichtung (*aspect*). Die Umgebungsstrahlung eines Pixels errechnet sich aus einem Umfeld von 0,5 Kilometer mit Hilfe des so genannten *terrain view* Faktors (Richter 2010). Sowohl den *terrain view* Faktor als auch den *sky view* Faktor errechnet sich das Programm selbständig aus dem Geländemodell.

Die beiden bereits erwähnten Gleichungen zur Atmosphärenkorrektur können laut Richter 2010 für ein stark reliefiertes Gelände wie folgt erweitert werden (Gleichung 4.3):

$$\rho^i(x, y) = \frac{\pi[d^2(c_0 + c_1 DN(x, y)) - L_p(z, \Theta_v, \Phi)]}{\tau_v(z, \Theta_v)[b(x, y)E_s\tau_s(z)\cos\beta(x, y) + E_t^i(z, \rho_r)\rho_{\text{terrain}}^{-(i-1)}V_{\text{terrain}}(x, y)]} \quad 4.3$$

Wobei:

x, y	horizontale Koordinaten
z	vertikale Koordinate
$DN(x, y)$	Grauwert eines Pixels
$L_p(z, \Theta_v, \Phi)$	Hintergrundstrahlung (<i>path radiance</i>), abhängig von der Geländehöhe und der Aufnahmegeometrie
$\tau_v(z, \Theta_v)$	Durchlässigkeit der Atmosphäre zwischen Boden und Sensor; abhängig vom Einfallswinkel, beinhaltet direkte und diffuse Komponenten
$\tau_s(z)$	Durchlässigkeit der Atmosphäre zwischen Sonne und Boden
$\beta(x, y)$	Beleuchtungswinkel
$b(x, y)$	Binärer Faktor: Null oder Eins, je nachdem ob der Pixel eine solare Einstrahlung erhält oder nicht
E_s	extraterrestrische Solarstrahlung
$E_d^*(x, y, z)$	Diffuse solare Flussdichte (<i>solar flux</i>) auf einer geneigten Oberfläche (wird durch eine zusätzliche Gleichung siehe Richter 2010 noch genauer beschrieben)
$E_g z$	Globale Flussdichte (<i>global flux</i>) (direkter und diffuser <i>solar flux</i> , bei der Höhe z)
$E_t(z)$	Reflektierte Strahlung der Umgebung
$\rho_{-(i)}^{(0)} \text{ terrain}$	0.1: anfänglicher Durchschnittswert der Oberflächenreflexion
$\rho_{\text{terrain}}(x, y)$	lokal unterschiedlicher Mittelwert der Geländereflexion, iterativ berechnet
$V_{\text{terrain}}(x, y)$	<i>Terrain view factor</i> (Wertebereich von 0-1)

Die drei wichtigsten atmosphärischen Parameter, die sowohl in Raum als auch Zeit variieren sind der Aerosolgehalt, die optische Dichte und der Wasserdampf. Die Berechnung dieser drei Komponenten wird im Folgenden noch kurz erläutert, für weiterführende Berechnungen sei der Leser hiermit an Richter 2010 verwiesen.

Aerosolgehalt

Der Aerosolgehalt beinhaltet die Absorptions- und Streueigenschaften der Partikel und die Abhängigkeit der Wellenlänge der optischen Eigenschaften. In *Atcor3* stehen vier verschiedene Aerosoltypen zur Auswahl: rural, urban, maritim und wüst. Diese vier groben Einteilungen

weisen wiederum zahlreiche Untergliederungsmöglichkeiten auf. Der Aerosoltyp kann entweder aus der Satellitenbildszene extrahiert werden, oder vom Nutzer definiert werden. Im Zuge dieser Arbeit wird der Aerosolgehalt als tropisch-maritim bestimmt.

Sichtweite und optische Dichte

Die Sichtweite wird durch die maximale horizontale Distanz bestimmt, in der das menschliche Auge ein dunkles Objekt von einem hellen Horizont unterscheiden kann. Die optische Dichte hingegen ist das Produkt des Extinktionskoeffizienten und der Weglänge (*path length*). Diese beiden in unterschiedliche Richtungen weisenden Größen (horizontal und vertikal) können mit Hilfe der *MODTRAN* (*moderate resolution atmospheric transmission*) Datenbank in Relation zueinander gesetzt werden (Richter 2010). Die *MODTRAN* Datenbank stützt sich auf in situ Messungen und validierte Ergebnisse der atmosphärischen Zusammensetzung. Dieser atmosphärische Strahlungstransferkode wurde von Wissenschaftlern des *US Air Force Research Laboratory* entwickelt, und berücksichtigt die Effekte von molekularer und partikularer Absorption, Bodenstreuung, Emission, solarer und lunarer Einstrahlung, sowie der sphärischen Refraktion (www.modtran.org). Im Zuge der Atmosphärenkorrektur gilt es die Sichtweite zu ermitteln, da diese als ein Input-Parameter für die *MODTRAN* Datenbank benötigt wird. Die Sichtweite kann interaktiv im *SPECTRA* Modul der *Atcor3 Software* berechnet, oder vom Programm automatisch generiert werden. Im Zuge dieser Arbeit wird sie automatisch aus der Satellitenbildszene extrahiert.

Wasserdampf

Der Wasserdampf kann direkt aus den Satellitenbilddaten abgeschätzt werden, wenn der Sensor über einen Band in diesem Bereich verfügt. Ansonsten wird er je nach Jahreszeit geschätzt. Im Falle der SPOT 5 Satellitenbildszenen wird der Wasserdampf von der *Software* selbst geschätzt.

Das Herzstück der *Atcor3 Software* ist das *SPECTRA*-Modul, mit dessen Hilfe die Kalibrierung der Reflexionswerte durchgeführt wird. Die Kalibrierungskoeffizienten können aus den Metadaten des jeweiligen Sensors abgelesen werden, wobei jedes Band über seinen eigenen *gain*-Faktor verfügt. Dieser wird in das jeweils speziell zu dieser Satellitenbildaufnahme gehörenden Kalibrierungsdatei gespeichert. Eine Hauptaufgabe der Atmosphärenkorrektur ist es den zweiten Faktor (*bias*) zu bestimmen. Dies geschieht über spektrale Reflexionskurven. *Atcor3* beinhaltet bereits atmosphärisch bereinigte spektrale Signaturen von verschiedenen Vegetationsarten, Gesteins- und Bodentypen und anderen Objekten wie zum Beispiel Asphalt. Weicht die spektrale Signatur des hier verwendeten Satellitenbildes stark von den vorgegebenen Kurven ab, ist dies der störende Einfluss der Atmosphäre, den es zu korrigieren gilt. Die *bias*-Kalibrierungsfaktoren werden also selbst individuell für jedes Satellitenbild festgelegt. Bei der Anpassung der Kalibrierungsdatei wird darauf geachtet, dass für die Reflexionskurven gleiche Bereiche in beiden Satellitenbildern (pre und post) ausgewählt werden, die sich höchstwahrscheinlich über die vergangenen zwei Jahre hinweg nicht verändert haben.

Um in stark reliefiertem Gelände mit sonnenzugewandter beziehungsweise sonnenabgewandter Hangausrichtung eine Überkorrektur der Satellitenbildszene zu vermeiden, kann eine *BRDF-Korrektur* (*bidirectional reflectance distribution function*) durchgeführt werden. (Richter 2010). Aufgrund des bereits mehrfach angesprochenen steilen Reliefs sowohl in La Palma als auch in Griechenland, wird die bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion durchgeführt. Dabei können in den meisten Bereichen gute Ergebnisse erzielt werden, so dass nur noch wenige, sehr steile Gebiete von einer Überkorrektur betroffen sind.

Nach vorgenommener Anpassung der beiden Szenen kann die Atmosphärenkorrektur gestartet werden. Weitere störende Effekte wie Dunst und Schatten können ebenfalls reduziert werden. Da jedoch in den hier vorliegenden Satellitenbildaufnahmen keine, oder nur wenige Wolken vorhanden sind, wird auf diese Verbesserung verzichtet, da sich die Werte nach der Korrektur erhöhen, was zu einer Überkorrektur in manchen Bildbereichen führt. Abbildung 4-2 zeigt die SPOT 5 Satellitenbildszene des 07.08.2009 links vor, und rechts nach der Atmosphärenkorrektur. Dabei ist klar ersichtlich, dass das Satellitenbild vor der Atmosphärenkorrektur deutlich unschärfer wirkt. Der Bereich der Brandfläche hebt sich nach der radiometrischen Kalibrierung besser von den restlichen Bereichen der Insel ab.

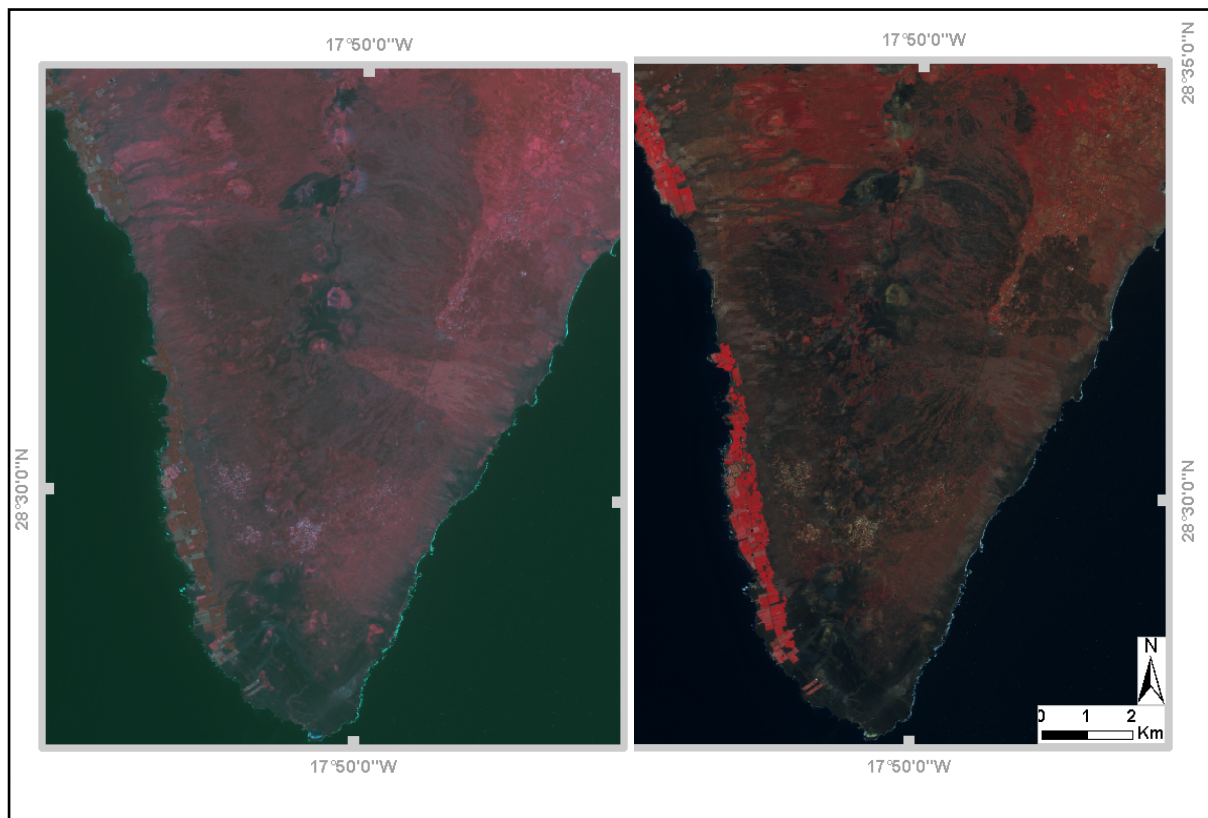


Abbildung 4-2: SPOT 5 Satellitenbildszenen La Palmas vor und nach der Atmosphärenkorrektur, eigene Darstellung

4.2 Vorverarbeitung der Radar-Daten

Wie bereits unter Punkt 3.2.3 gezeigt, können TerraSAR-X Daten in verschiedenen Prozessierungsstadien erworben werden. Um die Daten so genau wie möglich aufeinander abzustimmen, wird im Zuge dieser Arbeit entschieden alle Daten im geringsten Prozessierungslevel zu erwerben und mit Hilfe der *Software SARscape* zu prozessieren. Dieses Programm ist speziell auf Radardaten zugeschnitten und ist in die *Software Envi* implementiert. *SARscape* ermöglicht ein Verarbeiten der Daten ab dem absoluten Rohzustand und beinhaltet neben vielen anderen Funktionen die für diese Arbeit wichtigen Schritte des Geokodierens, der radiometrischen Kalibrierung und Filterung. Alle diese Schritte gehen von den unprozessierten Rohdaten (SSC-Datenformat) aus und bauen aufeinander auf. Dabei ist die Prozessierungsreihenfolge von *SARscape* vorgegeben, was ein Verarbeiten der Rohdaten in immer höhere Prozessierungslevel ohne den geringsten Informationsverlust oder mögliche Sinnfehler ermöglicht. Ein Ziel dieser Diplomarbeit besteht darin, das ZKI *Fire-Tool* (siehe Kapitel 1) um ein Radar-Verfahren zur Brandflächendetektion zu erweitern. Das in dieser Arbeit gewählte multitemporale Verfahren benötigt ein adäquates Vorverarbeiten der Radar-Daten, was eine *speckle*-Reduktion und eine geometrische und radiometrische Kalibrierung beinhaltet.

In den nächsten Punkten wird näher beschrieben, wie die Vorverarbeitung der Radar-Daten durchgeführt wird.

4.2.1 *Speckle*-Reduktion

Wie bereits unter Punkt 3.2.4 erklärt wurde, wird im Zuge dieser Arbeit auf fensterbasierte Filtermethoden zur *speckle*-Reduktion zurückgegriffen, da dieses Verfahren bei gegebener Datengrundlage die höchsten Klassifikationsgenauigkeiten verspricht. Mit Hilfe fensterbasierter Verfahren ist es möglich Bildstrukturen zu verändern, die sich nicht in den Grauwerten einzelner Pixel, sondern in den Grauwertrelationen benachbarter Pixel ausdrücken (Albertz 2007). Um einen geeigneten Filter für die vorliegenden TerraSAR-X Satellitenbildszenen zu ermitteln, wird ein Bildausschnitt der die ganze Satellitenbildszene repräsentiert ausgewählt. Der Filter wird sowohl auf seine Eigenschaften des Glättens, als auch zur Linien- und Kantenerkennung getestet. Der gewählte Bildausschnitt wird mit verschiedenen Verfahren gefiltert, und visuell das beste Ergebnis wird als Filteralgorithmus für die restlichen Szenen verwendet. Dabei werden etablierte und von den meisten Bildverarbeitungsprogrammen bereitgestellte adaptive Filteralgorithmen getestet. Dazu zählen der *Mean*, *Median*, *Local-Region*, *Lee*-, *Lee-Sigma*, *Frost*, und *Gamma-de-MAP*- Filter. Im Folgenden wird kurz die Funktionsweise der einzelnen Filter erläutert.

Zu den am wenigsten komplexen dieser Filter zählen der *Mean*, *Median* und *Local-Region* Filter. Der *Mean* Filter ersetzt das zentrale Bildelement durch den arithmetischen Mittelwert aller Bildwerte des selbst definierten Filterfensters. Der *Median* Filter reiht alle Werte des

Fensters in aufsteigender Reihenfolge auf. Das zentrale Bildelement wird durch den Wert in der Mitte dieser Reihe ersetzt. Der *Local-Region* Filter unterteilt das Filterfenster in acht verschiedene Regionen und berechnet für jede die Varianz. Anschließend wird der Varianzwert mit dem Wert des zentralen Bildelements verglichen, und durch den Mittelwert aller Werte des Bereiches ersetzt, der die geringste Varianz aufweist (ERDAS, Inc 2009).

Sowohl der *Lee*-Filter also auch der *Lee-Sigma*-Filter gehen von einer Gauß'schen Verteilung des störenden Bildrauschens aus. Dieses multiplikative Modell berechnet die Filterwirkung über die lokale Statistik der Grauwerte (Lee 1980). Der *Lee-Sigma*-Filter nimmt darüber hinaus vereinfachend an, dass verrauschte Bildelemente nur innerhalb einer bestimmten, über die Standardabweichung zu definierenden Wertespanne liegen (Lee 1983). Ähnlich dazu funktioniert der *Frost*-Filter, der ebenfalls von einer Gauß'schen Verteilung des *speckle* ausgeht und damit die lokale Statistik der Bilddaten berücksichtigt (Frost et al. 1982). Dabei werden die einzelnen Elemente innerhalb des Filterfensters gewichtet. Die Gewichtung hängt dabei von der lokalen Varianz ab und reduziert sich mit zunehmender Entfernung vom zentralen Bildpunkt.

Der *Gamma-MAP* Filter geht hingegen von einer Gamma-Verteilung des Rauschens aus. Er nutzt den lokalen Mittelwert sowie die Varianz der Streuung zur Filterwirkung (Lopes et al. 1993). Berücksichtigt man die hohe Rauschanfälligkeit von Radar-Daten, wird der *speckle* durch eine Gamma-Verteilung am Besten repräsentiert (SARMAP 2009). Der *Gamma-MAP* Filter wurde von Lopes et al. 1993 auf Basis des *Maximum-A-Posteriori*-Filters von Kuan et al. 1987 entwickelt und basiert dabei auf der Annahme, dass der tatsächliche Wert des zentralen Pixels zwischen dem gemessenen Grauwert und dem Mittelwert aller Bildelemente innerhalb des Fensters liegt. Der *Maximum-A-Posteriori*-Filter von Kuan et al. geht, genauso wie die beiden *Lee*-Filter, von einer linearen Kombination der beobachteten Intensität und des lokalen Intensitätsmittelwertes innerhalb des Filterfensters aus (Kuan et al. 1987). In der *Software SARscape* sind drei verschiedene *Gamma-MAP* Filter implementiert. Der *Gamma Gamma MAP*, der *Gamma Distribution-Entropy MAP (Gamma-de-MAP)*, und der *Gamma A Posteriori Mean* Filter. Der *Gamma-de-MAP* Filter wird ausgewählt, da er laut SARMAP 2009 die besten Resultate in stark texturierten, hoch auflösenden und stark reliefierten Satellitenbildszenen liefert.

Nach einem visuellen Vergleich der hier aufgeführten Filteralgorithmen stellt sich heraus, dass der *Gamma-de-MAP* Filter das beste Ergebnis der *speckle*-Reduktion liefert. Im Vergleich zu allen anderen Verfahren stellt dieser Filter die vorhandenen Bildstrukturen der TerraSAR-X Daten am deutlichsten heraus. Deswegen werden sowohl die Satellitenbildszenen von Griechenland als auch die von La Palma mit diesem Filter prozessiert. Dies wird in der *Software SARscape* umgesetzt. Abbildung 4-3 zeigt die TerraSAR-X Satellitenbildszene Griechenlands vom 29.08.2009 im linken Bild vor der *speckle*-Reduktion und im rechten Bild danach. Es wird deutlich, dass ähnliche Bildstrukturen nach der *speckle*-Reduktion homogener erscheinen, Bildübergänge und Kanten jedoch gut

erhalten bleiben. Das gefilterte Bild wirkt allgemein mehr geglättet und schärfer. Ebenfalls können Überkorrekturen des Radar-Signals an Sensor zugewandten Hängen reduziert werden.

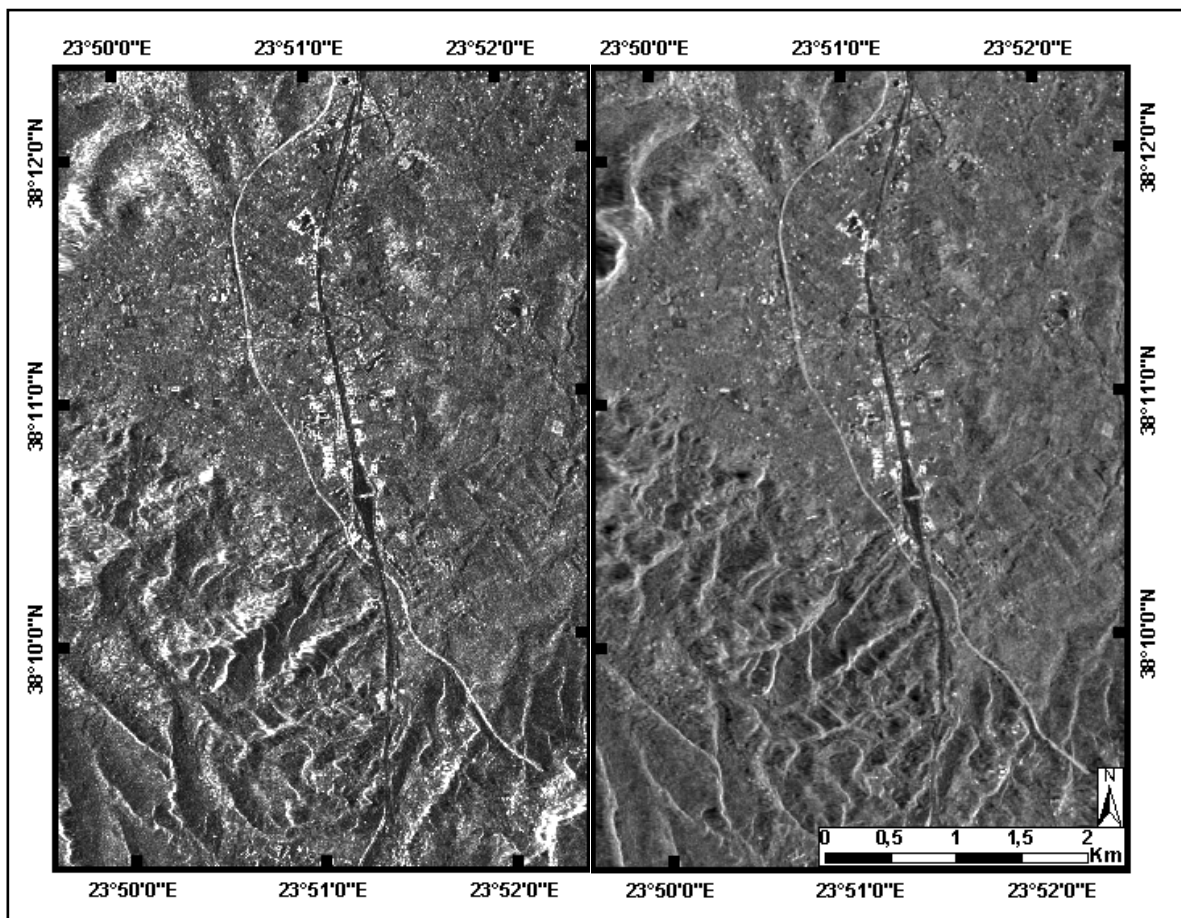


Abbildung 4-3: *Speckle-Reduktion der TerraSAR-X Satellitenbildszene in Griechenland vom 29.08.2009, eigene Darstellung*

Wie bereits erwähnt folgt die Datenprozessierung in *SARscape* einer bestimmten Reihenfolge, die der Nutzer beachten muss. Um die Daten in *SARscape* bearbeiten zu können, müssen sie in einem speziell für diese *Software* benötigten Format vorliegen. Die SSC-Daten können in *SARscape* importiert werden, und mit Hilfe der dazugehörigen Metadaten kann ein *SARscape* eigenes Datenformat generiert werden. In diesem Schritt kann die gewünschte Pixelauflösung (bedingt durch die gewählte *number of looks*) selbst bestimmt werden. Im Zuge dieser Arbeit wird die für die *Stripmap*-Aufnahmen übliche Auflösung von drei Meter pro Pixel gewählt. Dieses generierte Datenformat kann nun gefiltert werden. Die Datenfilterung wird vor der Geokodierung durchgeführt, da dem Satellitenbild im Zuge der Geokodierung eine Projektion zugewiesen wird, was zwangsweise zu einem *resampeln* des Bildes führt. Dies verändert die einzelnen Pixelwerte der Satellitenbildszene bereits. Deswegen wird das Satellitenbild zuerst gefiltert und dann erst geometrisch und radiometrisch korrigiert. Liegt ein Satellitenbild in EEC-Format vor, ist es mit der *Software SARscape* nicht möglich das Bild zu filtern. Es sollte daher darauf geachtet werden, die Satellitenbildszenen in SSC-Format zu bestellen, um eine passende Vorprozessierung zu garantieren. Jedoch kann es der Fall sein, dass im Zuge des

rapid mapping zum Beispiel Archivszenen nur im EEC-Format vorliegen. Tritt dieser Umstand ein, muss ein Informationsverlust durch einen Filteralgorithmus in einem anderen Bildverarbeitungsprogramm in Kauf genommen werden.

4.2.2 Radiometrische und geometrische Kalibrierung

Geokodieren, Georeferenzieren und geometrische Kalibration sind Synonyme, und werden ebenfalls in dieser Arbeit als solche verwendet (SARMAP 2009).

Im SSC-Format liegen die Daten in den zwei verschiedenen Auflösungen *range* und *Azimuth* vor. Der Nutzer kann die gewünschte räumliche Auflösung durch ein Variieren der *number of looks* verändern. Aufgrund von stark unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften in *range* und *Azimuth* (siehe Punkt 3.2.1), und um die Geometrie eines Radarbildes vollständig erfassen zu können, muss die *across-track* und *along-track* Richtung getrennt voneinander betrachtet werden (Meier et al. 1993). Aufgrund ihrer Entstehung charakterisieren sich Radarbilder durch große Verzerrungen in *range* Richtung. Diese werden vor allem durch topographische Veränderungen hervorgerufen und können leicht korrigiert werden. Schwächer, jedoch auch komplexer und schwieriger zu korrigieren, sind die Verzerrungen in *Azimuth* Richtung (Cumming & Wong 2005). Mit Hilfe eines digitalen Geländemodells können die Positionen der Rückstreuerelemente in *slant range* Bildkoordinaten umgewandelt werden. Diese Transformation von dreidimensionalen Objekten in ein zweidimensionales Reihen- und Spaltenreferenzsystem des *slant range*- Bildes wird durch ein rigores Anwenden der *range* und *Doppler*-Gleichungen ermöglicht (Meier et al. 1993).

$$\begin{aligned} R &= S - P \\ f_D &= \frac{2f_o(v_p - v_s)R_s}{c|R_s|} \end{aligned} \quad 4.4$$

Wobei:

R_s	=	<i>slant range</i>
S & P	=	Satellitenposition und Rückstreuursprung (backscatter element position)
v_s & v_p	=	Satellitengeschwindigkeit und Geschwindigkeit des Rückstreuers (backscatter element velocity)
f_o	=	Trägerfrequenz
c	=	Geschwindigkeit des Lichts
f_D	=	prozessierte Dopplerfrequenz

Während des Geokodierens werden geodätische und kartographische Transformationen durchgeführt, um das Satellitenbild von einem globalen kartesischen Koordinatensystem (zum Beispiel WGS-84) in ein lokales kartographisches Referenzsystem (zum Beispiel UTM-32, Gauss-Krüger) umzuwandeln. Im Zuge des Geokodierens wird automatisch unter zu Hilfenahme des digitalen Geländemodells ein Orthorektifizieren des Satellitenbildes durchgeführt (SARMAP 2009).

Da in dieser Arbeit TerraSAR-X Daten verschiedener Zeitpunkte und verschiedener Polarisationen miteinander verglichen werden, ist eine radiometrische Kalibrierung nötig. In *SARscape* folgt die radiometrische Kalibrierung dem Radargleichungsgesetz. Dies setzt Korrekturen in folgenden Punkten voraus: Jeder Pixel der beleuchteten Fläche wird normalisiert, da aufgrund von Topographie und Einfallswinkel die Beleuchtung der einzelnen Auflösungszellen variiert und dieser Effekt berücksichtigt werden muss. *Range*-Variationen der Empfängerverstärkung werden mit Hilfe eines digitalen Geländemodells verbessert. Der Antennengewinn kann dabei als das Verhältnis zwischen ausgesandtem und empfangenem Signal ausgedrückt werden. Als dritter Punkt wird das empfangene Signal dahingehend korrigiert, dass die Variation der Entfernung vom Sensor zur Erdoberfläche von *near range* zu *far range* berücksichtigt wird. Die Basis für die radiometrische Kalibrierung ist die Radargleichung nach Holecz et al. 1993:

$$P_d = \frac{P_t G_t^A (\theta_{el} \theta_{az}) \lambda^3 G_r^E G_p}{(4\pi)^3 R^3 L_s L_a} \sigma^0 \frac{P_r P_a}{\sin \theta_{ir} \cos \theta_{ia}} + P_n \quad 4.5$$

Wobei:

P_d	=	empfangene Energie von verschiedenen Streuern
P_t	=	abgestrahlte Energie
P_n	=	Rauschen
P_r	=	Bildpunkt in Distanz
P_a	=	Azimuthaler Bildpunkt
G^A	=	Antennengewinn (Senden und Empfangen)
G^E	=	Verstärkung
G_p	=	Konstantenanteil
R	=	Raumwinkelverlust
θ_{el}	=	Antennenelevationswinkel
θ_{az}	=	Antennenazimuthwinkel
θ_{ir}	=	lokaler Einfallswinkel in <i>range</i>
θ_{ia}	=	lokaler Einfallswinkel in Azimuth
L_a	=	Atmosphärische Verluste
L_s	=	Systemverluste

Um alle benötigten geometrischen Parameter errechnen zu können, ist ein digitales Geländemodell eine Grundvoraussetzung zur radiometrischen Kalibrierung. Die Kalibrierung wird während des Geokodierens durchgeführt, da hier die benötigten Parameter bereits berechnet werden. An dieser Stelle zeigt sich ein Vorteil der *Software*, da die radiometrische und geometrische Kalibrierung simultan ablaufen und nicht zwei Prozessierungsschritte nötig sind. Die SSC-Daten wurden bereits in *SARscape* importiert und gefiltert. In einem nächsten Schritt wird mit Hilfe des digitalen Geländemodells (siehe Punkt 2.2.2) die radiometrische und geometrische Kalibrierung durchgeführt. Der hierbei entstehende kalibrierte Wert ist eine normalisierte, dimensionslose Zahl. Diese Zahl kann in Sigma Nought, in der der Rückstreukoeffizient üblicherweise angegeben wird, umgerechnet werden (Esch 2006). Dies wird in der *Software ERDAS* mit Hilfe des *Modelers* durchgeführt. Somit entstehen als Endprodukt der radiometrischen Kalibrierung Werte, die aufgrund ihres hohen Dynamikbereichs mit einem logarithmischen Maß in Dezibel [dB] angegeben werden. In der Regel werden die Daten in einer radiometrischen Auflösung von 16-bit, was 65.536 Graustufen entspricht, aufgezeichnet und weiter prozessiert (Esch 2006).

In Kapitel 4 wurde die Datenvorverarbeitung sowohl der optischen als auch der Radar-Daten erläutert. Die in dieser Arbeit beschriebene Datenvorverarbeitung der Satellitenbildszenen stellt eine optimale Vorprozessierung der Daten dar. Vor dem Hintergrund einer Katastrophe und der damit verbundenen schnellstmöglichen Kartierung des Ereignisses kann es aus Zeitmangel möglich sein, dass die Vorprozessierungsschritte nicht immer, oder nur zum Teil, durchgeführt werden können. In diesem Fall ist bei einer Anwendung des in dieser Diplomarbeit entwickelten Algorithmus zur Brandflächendetektion mit einem schlechteren Klassifikationsergebnis zu rechnen.

5. Entwicklung objekt-basierter Brandflächendetektionsmodelle auf Basis SPOT 5 und TerraSAR-X Satellitendaten

Der Kontext der Katastrophen-Schnellkartierung, in dem diese Diplomarbeit entstand, setzt ein robustes, schnell anwendbares, leicht bedienbares und übertragbares Verfahren zur Brandflächendetektion voraus (siehe Kapitel 1). Ebenfalls wurde in Kapitel 1 erläutert, dass eine weitere Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit die Erweiterung des bereits bestehenden *Fire-Tools* um multitemporale Verfahren sowohl mit optischen als auch mit Radar-Daten darstellt. Das von Marcus Bindel im Zuge einer am ZKI Betreuten Diplomarbeit entwickelte *Tool* basiert auf monotemporalen, mittel- bis hochauflösenden Satellitendaten, die über ein Band im grünen, roten und nahen Infrarot des elektromagnetischen Spektrums verfügen. Angewandt auf die Waldbrände 2009 in Griechenland und La Palma führte dieses *Tool* jedoch zu einer hohen Fehlklassifikation von Wasserbereichen, Wolkenschatten und Freiflächen. Ziel und Aufgabe dieser Diplomarbeit ist es diese Schwächen zu reduzieren. Dies soll durch ein miteinbeziehen multitemporaler Verfahren, die sowohl auf optischen als auch auf Radar-Daten beruhen gelingen. Im Verlauf dieser Arbeit kristallisierten sich die Satelliten SPOT 5 und TerraSAR-X zur Algorithmusentwicklung heraus (siehe Punkt 2.2). Nach einer umfassenden Literaturrecherche (siehe Kapitel 3) zeigte sich, dass eine Brandflächendetektion mit Indices, die auf dem mittleren und nahen Infrarot beruhen, die größte Genauigkeit verspricht. Sowohl der multitemporale Ansatz, als auch ein auf Indices beruhendes Verfahren machten eine adäquate Datenvorverarbeitung nötig (siehe Kapitel 4).

In diesem Kapitel wird die genaue Algorithmusentwicklung für ein objekt-basiertes, semi-automatisches Brandflächendetektionsverfahren für den mediterranen Raum erläutert. Die Herausforderung dieser Arbeit liegt im Besonderen darin einen schnell durchführbaren, genauen, leicht anwendbaren und übertragbaren Algorithmus zur Brandflächendetektion zu entwickeln, der sowohl auf optischen Daten als auch auf Radar-Daten basiert. Im Folgenden werden drei verschiedene Algorithmen zur Brandflächendetektion vorgestellt. Der erste Algorithmus basiert auf mono- und multitemporalen SPOT 5 Satellitendaten, der zweite Algorithmus baut auf multitemporalen TerraSAR-X Daten auf, und der dritte Algorithmus besteht aus einer Kombination dieser beiden Verfahren. Um die Benutzung der Verfahren zu Vereinfachen wird für alle drei Algorithmen eine Benutzerschnittstelle mit weiterführenden Erläuterungen in der *Software eCognition Developer* generiert, was ebenfalls in diesem Kapitel näher erläutert wird.

5.1 Entwicklung eines objekt-basierten Brandflächendetektionsmodells auf Basis optischer Satellitendaten mit mittlerem Infrarot

Ziel des optischen Algorithmus ist es ein robustes, aber so genau wie mögliches, objekt-basiertes, semi-automatisches Verfahren zur Brandflächendetektion zu ermitteln, das sowohl auf monotemporalen als auch auf multitemporalen Daten basiert. Eine weitere Voraussetzung

des Verfahrens ist es, eine im bereits bestehenden *Fire-Tool* (siehe Kapitel 1) häufig vorkommende Fehlklassifikation zwischen Wolkenschatten, Wasser- und Küstenbereichen zu verhindern. Das Klassifikationsergebnis sollte so genau wie möglich sein, und auch kleine nicht verbrannte Flächen innerhalb der Brandfläche, und kleine verbrannte Flächen außerhalb der Hauptbrandfläche erfassen. Ebenfalls sollte der Algorithmus so wenig Indices und Schwellwerte wie möglich enthalten, um im operationellen Dienst rasch und leicht angewendet werden zu können. Die Übertragbarkeit auf andere Gebiete und gegebenenfalls auch andere Satellitendaten, soll durch ein geringfügiges Anpassen der Schwellwerte möglich sein. Im Folgenden werden die verwendeten Indices, die Segmentierung und Klassifikation des Verfahrens näher erläutert. Um eine fundierte Auswahl der Indices treffen zu können wird eine Trennbarkeitsanalyse durchgeführt, die auf Klassen einer unüberwachten Klassifikation beruht. Um sowohl dem monotemporalen als auch dem multitemporalen Ansatz zu genügen, werden zwei verschiedene Verfahren zur Brandflächenextraktion entwickelt, die jedoch zum schnelleren und einfacheren Benutzen in einen Algorithmus integriert werden. Die Umsetzung des Algorithmus wird im Folgenden genau erläutert.

5.1.1 Unüberwachte Klassifikation

Der große Vorteil einer unüberwachten Klassifikation wurde bereits unter Punkt 3.2.4 erwähnt und liegt darin, ohne vorherige Wertung den Computer Klassen bestimmen zu lassen. Für das Satellitenbild der Region Grammatiko in Griechenland wurde eine unüberwachte Klassifikation von zwei bis neun Klassen durchgeführt. Anhand der visuellen Überprüfung erzielt die Klassifikation mit acht Klassen die beste Wiedergabe der Realität. Abbildung 5-1 zeigt das klassifizierte Satellitenbild mit den dazugehörigen Klassen Wasser, Wolkenschatten, Brandfläche, dichte Vegetation, spärliche Vegetation, Freifläche, urbaner Bereich und Wolke. Weite Teile des Satellitenbildes können mit Hilfe der unüberwachten Klassifikation gut erfasst werden. Für die Satellitenbildszene vom 07.08.2009 in La Palma wird ebenfalls eine unüberwachte Klassifikation durchgeführt. Das jedoch bereits angesprochene Lavagestein, weist über weite Teile der Insel die gleichen spektralen Eigenschaften auf. Deswegen kann lediglich eine Unterscheidung in die zwei Klassen Wasser und Land getroffen werden. Da jedoch beide Untersuchungsgebiete im mediterranen Bereich liegen, und visuell die gleichen Klassen wie in Griechenland auch auf La Palma identifiziert werden können, werden die acht Klassen von Griechenland auch für La Palma übernommen. In La Palma herrschte zum Zeitpunkt der Datenaufnahme am 07.08.2009 keine Bewölkung, weswegen die Klassen „Wolke“ und „Wolkenschatten“ hier wegfallen.

Die Wahl dieser acht Klassen stützt sich auf zahlreiche Überlegungen. So sollen diese Klassen die typische Vegetationszusammensetzung und Flächenverteilung der Satellitenbildszenen repräsentativ darstellen.

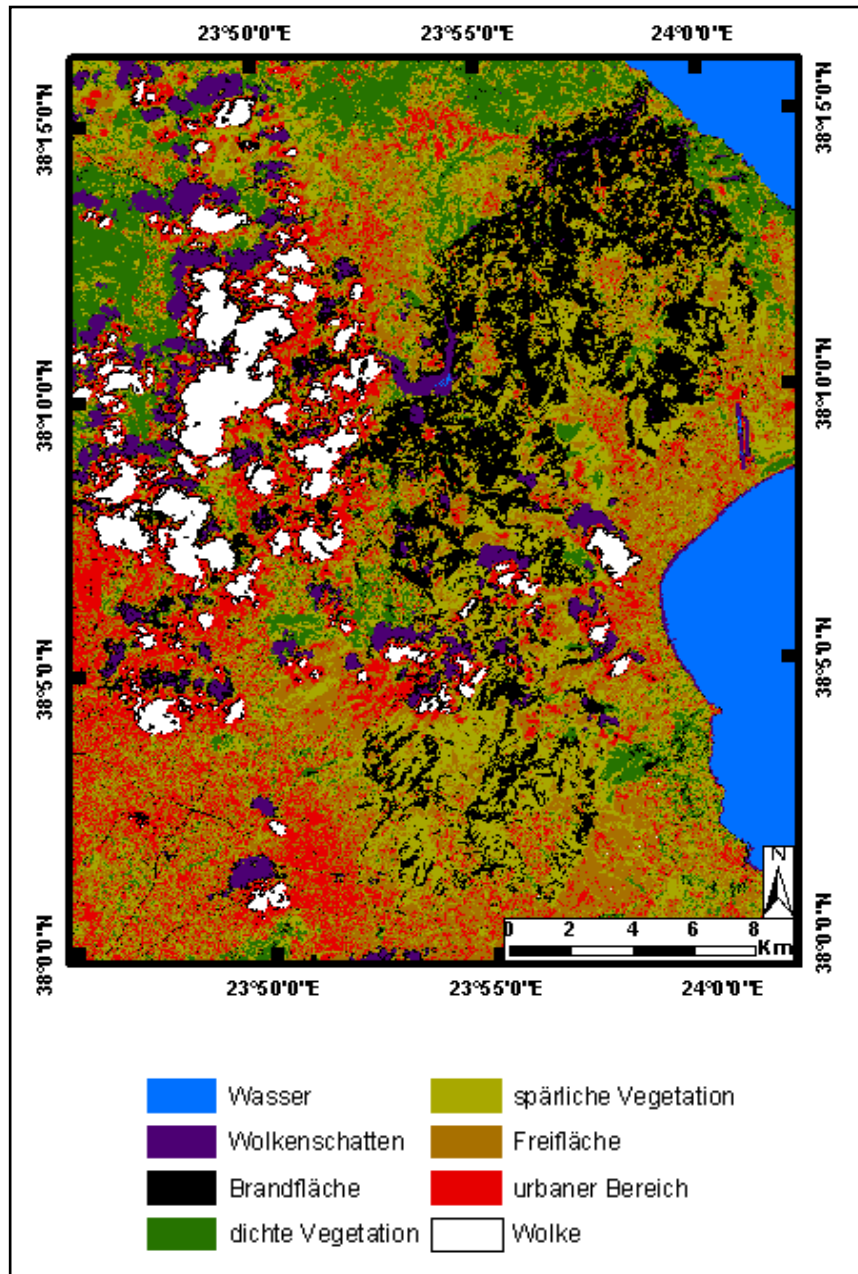


Abbildung 5-1: Unüberwachte Klassifikation, eigene Darstellung

5.1.2 Reflexionseigenschaften

Unter Punkt 3.2.2 wurde bereits die Reflexionseigenschaft einer Brandfläche im Vergleich zur vorher vorhandenen Bodenbedeckung in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums dargestellt. Im Folgenden wird die Reflexion der Brandfläche anhand der durch die unüberwachte Klassifikation entstandenen Klassen verglichen. Um für alle Klassen gleichermaßen repräsentative spektrale Signaturen zu erhalten, werden Referenzflächen von je 20 x 20 Pixel Größe gewählt. Pro Klasse werden fünf dieser Referenzflächen über die gesamte Satellitenbildszene verteilt. Die Klasse „Wolke“ weist sehr hohe Reflexionswerte auf, und wird in Abbildung 5-2 nicht berücksichtigt, da es die

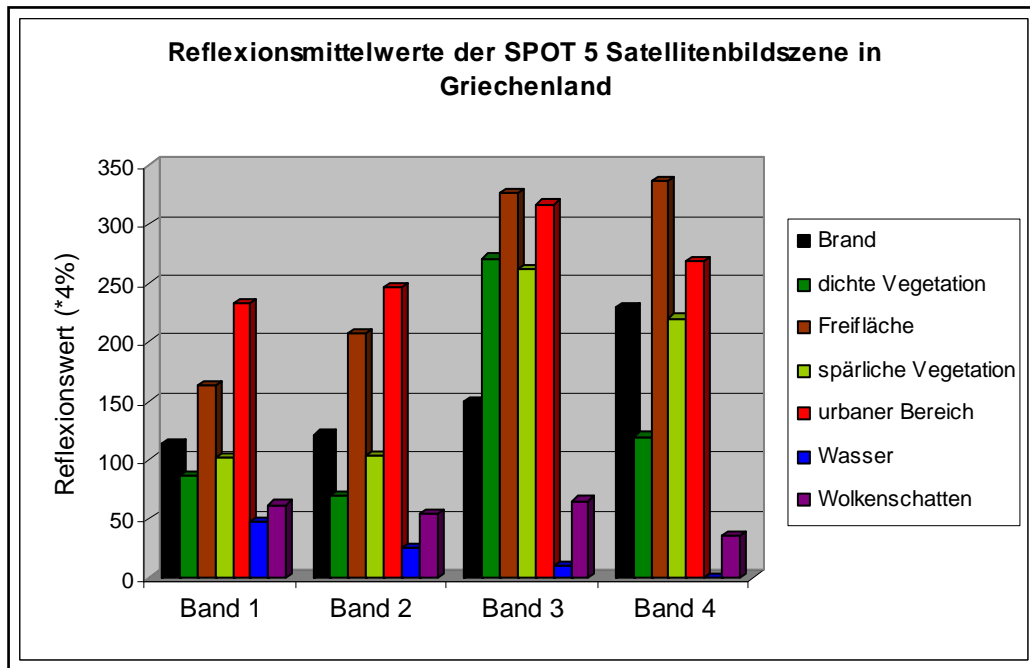


Abbildung 5-2: Reflexionsmittelwerte der SPOT 5 Satellitenbildszene in Griechenland, eigene Darstellung

Übersichtlichkeit stark mindert. Der besondere Augenmerk bei den Reflexionswerten der einzelnen Klassen liegt auf der Klasse „Brand“. In Abbildung 5–2 ist deutlich zu erkennen, dass die Brandfläche am Meisten im dritten und vierten Band, also im nahen und mittleren Infrarot, am Stärksten jedoch im mittleren Infrarot, reflektiert. Dies lässt sich durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz erklären. Demzufolge (siehe Gleichung 5.1) ist die Wellenlänge der maximalen Abstrahlung einer Oberfläche umgekehrt proportional zu seiner Temperatur (Albertz & Wiggenhagen 2008).

$$\lambda_{\max} = \frac{c_w}{T}$$

5.1

Wien'sche Konstante $c_w \approx 2898 \mu m K$

T = Objekttemperatur

Allerdings ist die Temperatur einer Brandfläche schwierig zu messen, weshalb auf Laborsimulationen zurückgegriffen wird. Dabei liegt die Temperatur eines Waldbrandes in einem Bereich von 570 – 1800 K (Martín et al. 1999). Daraus ergibt sich, dass je nach Temperatur der Brandfläche die Rückstrahlung in einem Wellenlängenbereich von circa 1,6 bis 5 μm am Größten ist. In diesem Bereich ist die emittierte Strahlung wesentlich höher als die terrestrische Hintergrundstrahlung. Damit lässt sich die Brandfläche gut detektieren. Dies

kann sowohl an den Waldbränden in Griechenland, als auch in La Palma bestätigt werden, da in beiden Satellitenbildszenen die Reflexion im vierten Band, dem mittleren Infrarot, am Höchsten ist. Dies zeigt bereits die Wichtigkeit des mittleren Infrarots zur Brandflächendetektion, und lässt in Bezug auf den nächsten Punkt erahnen, dass das mittlere Infrarot neben dem nahen Infrarot (siehe Punkt 3.1.1) die Hauptrolle zur Brandflächendetektion spielen wird.

5.1.3 Trennbarkeitsanalyse

Um fundierte Entscheidungen zu treffen, welche Indices zur Brandflächendetektion verwendet werden sollen, muss festgestellt werden in welchen Bändern sich die Brandfläche am Meisten von den anderen Klassen unterscheidet. Hierfür wird auf Basis der durch die unüberwachte Klassifikation entstandenen acht Klassen (bzw. sechs Klassen in La Palma) eine Trennbarkeitsanalyse durchgeführt. Das quantitative Verfahren zur Trennbarkeitsanalyse berechnet die statistische Trennbarkeit zwischen allen Klassen und wird in Form einer Matrix ausgegeben (Lillesand et al. 2004). Die *Software ERDAS* bietet vier verschiedene Methoden um eine quantitative Trennbarkeitsanalyse durchzuführen, die Verfahren *Euclidean Spectral Distance*, *Divergence*, *Transformed Divergence* und *Jefferies-Matusita*. Das *Euclidean Spectral Distance* Verfahren misst anhand von Vektoren die spektrale Differenz der einzelnen Klassen (ERDAS Inc, 2009). Die Methoden *Divergence*, *Transformed Divergence* und *Jefferies-Matusita* unterscheiden sich kaum voneinander und leiten sich von einer Berechnung

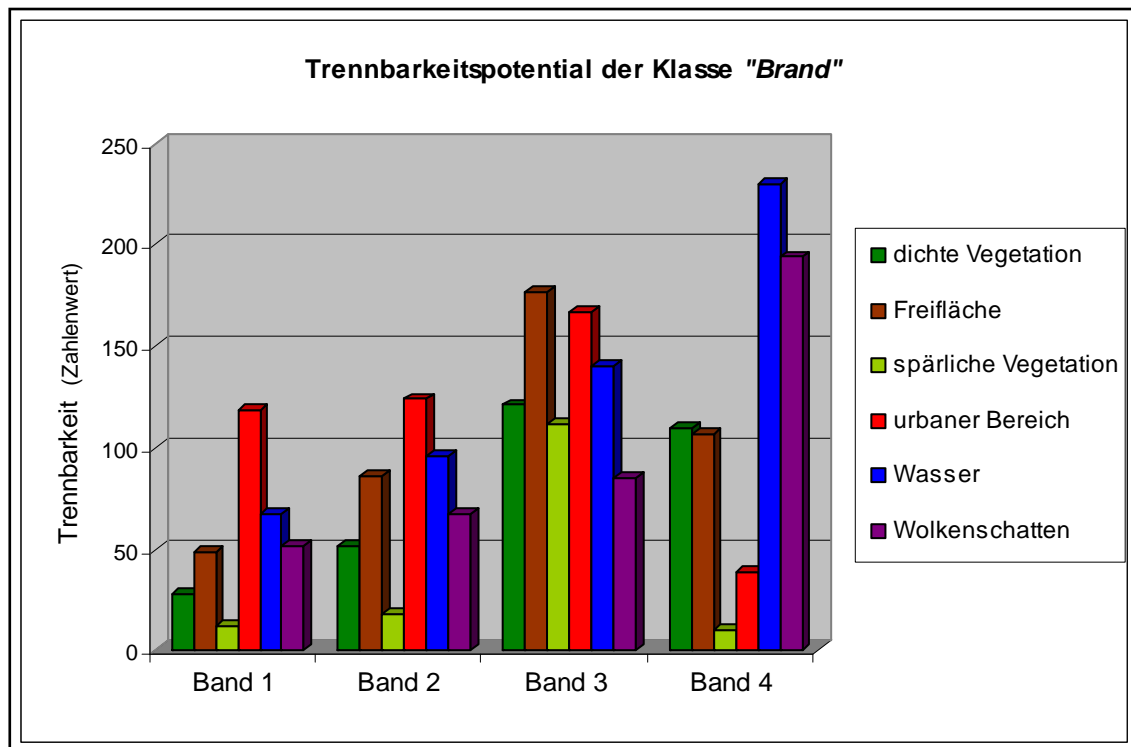


Abbildung 5-3: Trennbarkeitspotential der Klasse "Brand", eigene Darstellung

nach Swain & Davis 1978 ab, wobei ein exponentiell abnehmendes Gewicht auf die ansteigende Entfernung zwischen den Klassen gegeben wird. Im Zuge dieser Arbeit wird nach

einem empirischen Vergleich das *Euclidean Spectral Distance* Verfahren gewählt, da hier die Trennbarkeit der einzelnen Klassen am Besten zum Ausdruck kommt. Die Trennbarkeitsanalyse wird für alle Klassen sowohl in La Palma als auch in Griechenland durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur Visualisierung in einem Balkendiagramm dargestellt. Abbildung 5-3 zeigt die Trennbarkeit der einzelnen Klassen in jedem Band von der Klasse „Brand“. Je höher der Balken der jeweiligen Klasse ist, umso besser ist diese Klasse von der Klasse „Brand“ trennbar und somit besser klassifizierbar. Die Klasse „Wolke“ wird auch an dieser Stelle vernachlässigt, da sie eine extrem gute Trennbarkeit zur Klasse „Brand“ aufweist und dadurch die Graphik unübersichtlicher gestaltet hätte. Zur Veranschaulichung wurde das SPOPT 5 Satellitenbild vom 25.08.2009 von Griechenland verwendet, da hier im Gegensatz zu La Palma auch die Klasse „Wolkenschatten“ vorhanden ist. Die beste Trennbarkeit aller Klassen weist das nahe Infrarot auf, gefolgt vom mittleren Infrarot. Der urbane Bereich besitzt eine hohe und somit sehr starke Rückstrahlung, und kann deswegen von den dunklen Brandflächen gut unterschieden werden. Dies gilt auch im grünen und roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Band eins und zwei), die für die übrigen Klassen geringere Trennbarkeiten als das nahe und mittlere Infrarot (Band drei und vier) aufweisen. Laut Martín et al. 1999 und Pereira et al. 1999 kommt es bei Brandflächen oft zur Fehlklassifikation von Wasserbereichen, Wolkenschatten oder dichter Vegetation. Hier sei der besondere Augenmerk des Lesers auf das mittlere Infrarot gerichtet, da sich die Klassen „Wasser“ und „Wolkenschatten“ hier am Stärksten von der Klasse „Brand“ unterscheiden. Da das nahe Infrarot generell die beste Trennbarkeit für alle Klassen und das mittlere Infrarot die beste Trennbarkeit der kritischen Klassen aufweist, eignen sich somit diese beiden Bänder am Besten für eine monotemporale Brandflächendetektion. Unter Punkt 3.1.1 wurde bereits gezeigt, dass sich im Zuge einer multitemporalen Analyse das nahe Infrarot am Besten zur Brandflächendetektion eignet. Folglich müssen zur Brandflächendetektion Indices herangezogen werden, die auf dem nahen und mittleren Infrarot beruhen.

5.1.4 Auswahl der Indices

Die beiden vorhergehenden Punkte dienten zur Auswahl der Bänder, die im Bereich der spektralen Reflexion von Brandflächen die meiste Information enthalten. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die meist verwendeten Indices gegeben. Ebenfalls wird eine Auswahl an Indices getroffen, auf denen die Methode zur Brandflächendetektion in der *Software eCognition Developer* umgesetzt wird. Die gewählten Indices finden sowohl in der monotemporalen als auch in der multitemporalen Analyse Verwendung.

Generell entstehen Indices durch die algebraische Kombination verschiedener spektraler Bänder. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die gängigsten Indices, die zur Brandflächendetektion verwendet werden. Unter Punkt 3.1.2 wurde bereits ein Literaturüberblick zur Brandflächendetektion gegeben. In Tabelle 3-1 findet sich unter der Spalte *verwendete Methode* oft die Bezeichnung *spektrale Indices*. Autoren, die diese

Methode zur Brandflächendetektion verwenden, haben dabei auf Indices zurückgegriffen, die hier in Tabelle 5-1 dargestellt werden. Bei den meisten entwickelten Indices handelt es sich um Vegetationsindices, die im Zuge dieser Arbeit Aufschluss über den physischen und physiologischen Zustand der Vegetation geben (*NDVI*, *SAVI*, *MSAVI*, *ARVI*). Dadurch kann gesunde, gestresste und verbrannte Vegetation unterschieden werden. Generell drücken hohe Werte von Vegetationsindices einen hohen Vegetationsanteil, beziehungsweise eine hohe Vitalität aus, niedrige Werte bedeuten hingegen, dass nur spärliche oder gar keine Vegetation vorhanden ist. Neben einer Vielzahl von Vegetationsindices gibt es auch Indices, die speziell zur Brandflächendetektion entwickelt wurden, wie der *BAI* oder der *NDSWIR*. Diese Indices weisen einen umso höheren Wert auf, je schwerwiegender der Brand ist.

Indice	Formel	Autor
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	Rouse et al. 1974
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} (1 + L)$	Huete 1988
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = \frac{2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{2}$	Qi et al. 1994
Atmospherically Resistent Vegetation Index	$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{rb}}{\rho_{NIR} + \rho_{rb}}$ $\rho_{rb} = \rho_{RED} - \gamma(\rho_{BLUE} - \rho_{RED})$	Kaufman & Tanre 1992
Global Environmental Monitoring Index	$GEMI = \eta + (1 - 0.25\eta) - \frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}}$ $\eta = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) - 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5}$	Pinty & Verstraete 1992
Burned Area Index	$BAI = \frac{1}{(0.1 - \rho_{RED})^2 + (0.06 - \rho_{NIR})^2}$	Martín 1998
Normalized Difference Shortwave Infrared Index = Normalized burn ratio (NBR)	$NDSWIR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Gerard et al. 2003

Tabelle 5-1: Indices zur Brandflächendetektion

Nach Arino et al. 2001 ist der *NDVI* anfällig für atmosphärische Einflüsse und neigt bei trockenen Böden zu einer Verwechslung mit der Brandfläche. García & Chuvieco 2004 merken an, dass dieser Index für gesunde Vegetation entwickelt wurde und deswegen zur Brandflächendetektion keine guten Ergebnisse liefert. García & Chuvieco 2004 konnten eine vermehrte Fehlklassifikation von Wolken und Wolkenschatten auf Basis des *NDVI* feststellen. Diese genannten Aussagen stellen den *NDVI* als ungeeignet zur Brandflächendetektion heraus.

Der *SAVI* minimiert den Einfluss des Bodens auf die spektralen Reflexionswerte von Vegetation und ist damit nicht so anfällig für die Bodenstrahlung wie der *NDVI*. Der Faktor *L* ist jedoch unsicher zu berechnen oder zu schätzen.

Aufgrund dessen entwickelte Qi et al. 1994 den *MSAVI*, bei dem der Faktor *L* nicht mehr aus einer Konstanten berechnet wird wie im Zuge des *SAVI*, sondern als Funktion. Dadurch kann der Einfluss des Bodens aus der Vegetation weitestgehend herausgerechnet werden. Der *MSAVI* eignet sich von den Vegetationsindices deswegen am Besten zur Detektion einer Brandfläche.

Nach Koutsias & Karteris 1999 konnte der *ARVI* keine guten Ergebnisse zur Brandflächendetektion liefern. Zudem verfügt der SPOT 5 Satellit nicht über ein blaues Band, weswegen eine Anwendung dieses Indices nicht möglich ist.

Der *GEMI* wurde ursprünglich für den NOAA-AVHRR Sensor konzipiert, und ist auch auf andere Sensoren angewandt worden. Er wurde entwickelt um Atmosphäreneffekte und Effekte resultierend aus dem Vegetationshintergrund zu minimieren. Qi et al. 1994 zeigt, dass dieser Index die störenden Atmosphäreneffekte reduziert, jedoch hoch sensitiv auf Einflüsse des Bodens reagiert, was zu Fehlklassifikationen führen kann.

Nach García & Chuvieco 2004 und Stroppiana et al. 2009 eignet sich der *BAI* besonders gut für die Brandflächendetektion im mediterranen Raum. Nach Chuvieco et al. 2002 kann mit Hilfe dieses Indices eine Verwechslung von spektral ähnlichen Bereichen am Besten ausgeschlossen werden. Neben einer Minimierung des Einflusses der Atmosphäre wurde der Index zur Verstärkung des Kohlesignals entwickelt (Chuvieco et al. 2002).

Der *NDSWIR* eignet sich nach Jia et al. 2006 sehr gut zur Unterscheidung von toter Vegetation, Boden, Asche und verkohltem Holz. Er ist nach Miller & Thode 2007 besonders sensibel für die Veränderung des Feuchtegehalts und der Bodenbedingungen, sowie für den Chlorophyll- und Wassergehalt von Vegetation und eignet sich demnach hervorragend zur Brandflächendetektion.

Ein Ziel dieser Diplomarbeit ist es, dass die Brandflächendetektion so schnell und leicht wie möglich durchgeführt werden kann. Dies resultiert in einer Verwendung so weniger Indices

wie möglich. Dieser Umstand, und die aufgezeigten Stärken und Schwächen der hier angeführten Indices haben ergeben, dass sich der *MSAVI*, *BAI* und *NDSWIR* am besten zur Brandflächendetektion eignen. Diese drei Indices werden im Zuge der Algorithmusentwicklung verwendet.

Der Wertebereich des *MSAVI* und *NDSWIR* liegt zwischen -1 bis 1, wohingegen der Wertebereich des *BAI* von Null bis ∞ reicht.

5.1.5 Algorithmus

In diesem Punkt soll der entwickelte optische Algorithmus zur Brandflächendetektion für monotemporale und multitemporale Satellitenbilddaten zum besseren Verständnis kurz erklärt werden. In graphischer Form ist das Ablaufschema des Algorithmus unter Abbildung 5-4 noch einmal in einzelnen Schritten dargestellt.

Ein erster Schritt und damit die optimale Voraussetzung zur Umsetzung des Algorithmus stellen die geometrische und atmosphärische Korrektur dar. Vor allem im Hinblick auf eine Veränderungsanalyse sind beide Vorverarbeitungsmethoden, wie bereits unter Punkt 3.1.4 erklärt, besonders wichtig. Im Zuge des *rapid mapping* ist jedoch oft keine Zeit zur Datenvorverarbeitung vorhanden. Hier muss sich der Nutzer bewusst sein, dass die Datenvorverarbeitung die optimalsten Voraussetzungen für den hier entwickelten Algorithmus darstellen. Die Genauigkeit des Klassifikationsergebnisses steht dementsprechend in Abhängigkeit zur Vorverarbeitung der Daten. Die Herausforderung in der Vorverarbeitung multitemporaler Daten liegt darin, dass jeder Pixel der einzelnen Satellitenbilder genau die gleiche Messgröße und die gleiche geographische Position über einen gewissen Zeitraum behalten soll. Inadäquates Vorverarbeiten kann Fehler in der Klassifikation herbeiführen. In der Praxis besitzt jede Vorverarbeitungsmethode einen gewissen Ungenauigkeitsfaktor, was bei der Durchführung einer multitemporalen Analyse in Form von unterschiedlicher Schwellwertfindung beachtet werden muss (Kennedy et al. 2009). Eine unterlassene Atmosphärenkorrektur wirkt sich vor allem dadurch aus, dass die einzelnen Klassen spektral nicht so gut voneinander trennbar sind, was zu vermehrten Fehlklassifikationen von Brandflächen vor allem im Bereich von Wasserkörpern und Freiflächen führen kann (Pereira et al. 1999, Martín et al. 1999).

Als zweiten Schritt im Algorithmus zeigt Abbildung 5-4 die Segmentierung. Hier liegt das Ziel dieser Diplomarbeit darin einen Segmentierungsalgorithmus zu entwickeln, der auf verschiedene Satellitenbildszenen mit unterschiedlicher spektraler, radiometrischer und räumlicher Auflösung übertragbar ist, der jedoch auch genau genug ist, um kleine, nicht verbrannte Bereiche innerhalb der Brandflächen erfassen zu können. Dies wird durch zwei aufeinander aufbauenden Level, mit jeweils unterschiedlichen Segmentierungsmaßstäben bewerkstelligt. Punkt 5.1.6 erläutert die angewandte Segmentierung genauer.

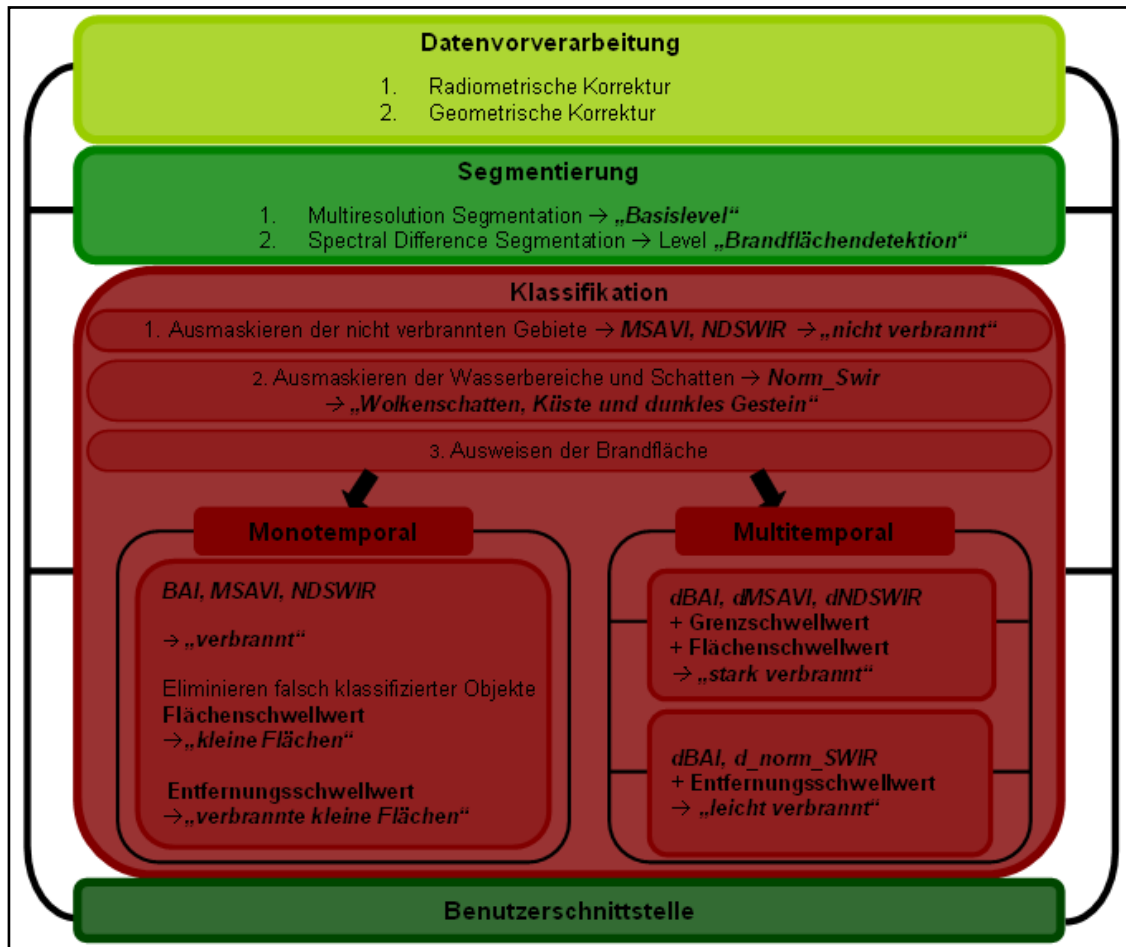


Abbildung 5–4: Schema des optischen Algorithmus, eigene Darstellung

Nachdem das Satellitenbild in spektral ähnliche Objekte eingeteilt worden ist, kann in einem dritten Schritt mit der Klassifikation begonnen werden. Dafür bilden die unter Punkt 5.1.4 näher erklärten Indices die Grundlage. Um eine spätere Fehlklassifikation zu vermeiden werden zunächst die unverbrannten Gebiete, Wasserbereiche und Wolkenschatten ausmaskiert. Als nächstes wird die Brandfläche detektiert, und kleine, spektral einer Brandfläche sehr ähnliche Bereiche (wie zum Beispiel kleine Straßenbereiche oder Freiflächen) eliminiert. Die Klassifikation der Brandfläche erfolgt je nach vorhandener Datengrundlage auf zwei verschiedene Arten (mono- oder multitemporal). Beim multitemporalen Verfahren kann zusätzlich zur Ausweisung der Brandfläche noch eine Aussage über den Grad der Verbrennung getroffen werden. Weitere Ausführungen hierzu finden sich unter Punkt 5.1.3.3.

Der gesamte Algorithmus wurde zum leichteren und schnelleren Bedienen in einem vierten und letzten Schritt in eine Benutzeroberfläche umgesetzt. Diese wurde mit Hilfe des *eCognition Architect* generiert. Genauere Erklärungen zur Generation der Benutzerschnittstelle finden sich in Punkt 5.1.3.4.

Nach einem kurzen Überblick werden die einzelnen Schritte im Folgenden genauer betrachtet.

5.1.6 Segmentierung

Grundsätzliches Ziel eines Segmentierungsalgorithmuses ist das Zusammenfassen von einzelnen Bildelementen basierend auf Homogenitätskriterien oder anhand der Differentiation zu Nachbarregionen (Schiewe 2002). Die Segmentierung unterteilt ein Satellitenbild in einzelne, sich nicht überlappende Regionen, wobei es gilt Objekte (wie zum Beispiel ein Haus) so real wie möglich zu erfassen. Um dies zu bewerkstelligen können mehrere aufeinander aufbauende Segmentierungen (so genannte Level) durchgeführt werden. Dabei liegt die Schwierigkeit darin, wirklichkeitsgetreue Objekte zu generieren (Schiewe 2002). Die entstandenen Segmente besitzen die gleichen spektralen Informationen (zum Beispiel Minimum oder Maximum) wie einzelne Pixel (Blaschke 2010). Da ein Satellitenbild jedoch nicht immer markante spektrale Grenzen aufweist, können in manchen Bildbereichen einzelne Objekte nicht klar von einander getrennt werden (Blaschke & Strobl 2001). Deswegen liegen die Nachteile jeder Segmentierung darin, dass die Objektgrenzen irregulär oder inkorrekt verlaufen können, oder dass eine Gruppe von Bildelementen verschiedene Landbedeckungen aufgrund von Unterklassifikation umschließt (Radoux & Defourny 2009). Die *Software eCognition Developer* weist eine Vielzahl verschiedener Segmentierungsalgorithmen auf, um diesen Problemen so gut wie möglich begegnen zu können. Die Auswahl einer geeigneten Segmentierung muss mit Bedacht und je nach Zielsetzung gewählt werden. Die Wahl des richtigen Segmentierungsalgorithmuses ist ein fundamentaler Schritt für ein gutes Klassifikationsergebnis, da er der Klassifikation vorausgeht und sie somit indirekt mitbestimmt (Neubert et al. 2009). Im Zuge dieser Arbeit wird die *Multiresolution Segmentation* verwendet, da sie Objekt-Primitive von hoher Qualität generiert, eine hohe Geschwindigkeit während der Prozessierung aufweist - was sich für große Satellitenbildszenen aus wichtig erweist - reproduzierbar, robust, und universell einsetzbar ist (Baatz & Schäpe 2000). Ebenfalls kann der Segmentierungsmaßstab selbst gewählt werden. Dies ist für die gegebene Aufgabenstellung von Bedeutung, da er sowohl bei Satellitenbildern gleicher räumlicher Auflösung variieren kann, um verschiedene Bildelemente (kleine inhomogene Objekte, große homogene Objekte) ausreichend erfassen zu können, als auch auf Satellitenbilder unterschiedlicher räumlicher Auflösung übertragbar sein muss. Für mehr Informationen zu den restlichen Segmentierungsalgorithmen, die die *Software eCognition Developer* zur Verfügung stellt sei der interessierte Leser an das *Definiens AG 2010 Reference-Book* verwiesen. Auf Basis des vom Nutzer festgelegten Segmentierungsmaßstabes (*scale parameter*) und anhand von Homogenitätskriterien fügt die *Multiresolution Segmentation* fortlaufend Pixel oder bereits bestehende Objekte zusammen, bis sie die gewählten Schwellwerte überschreiten. Der Segmentierungsmaßstab bezieht sich dabei auf die Größe der Objekte und auf die Homogenitätskriterien, die aus den vier Komponenten *Color* (spektrale Information), *Shape* (Homogenität der Textur), *Smoothness* (Feinheitsgrad) und *Compactness* (Kompaktheit) berechnet werden. Alle vier Kriterien fließen je nach der vom Benutzer definierten Gewichtung in das endgültige Homogenitätskriterium ein

(Definiens AG 2010). Abbildung 5-5 verdeutlicht das Ablaufdiagramm der Multiresolution Segmentation.

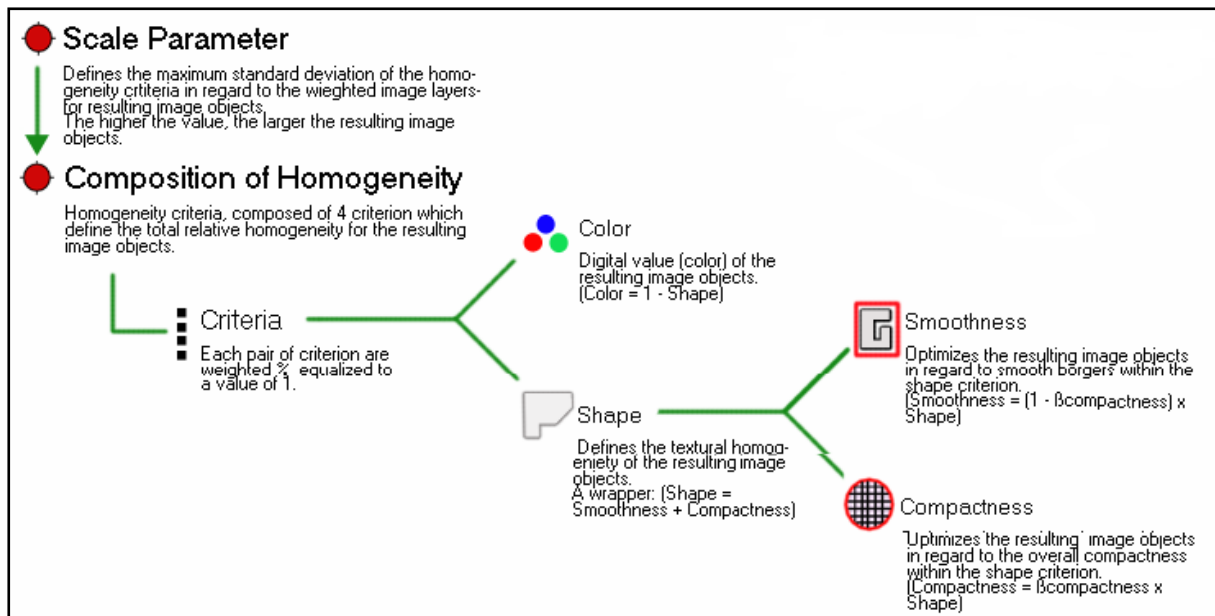


Abbildung 5-5: Multiresolution Segmentation, Definiens AG 2010

Der Benutzer kann sowohl die *Shape* als auch die *Compactness* im Algorithmus selbst definieren, wodurch gleichzeitig auch die *Color* ($1 - \text{Shape}$) und die *Smoothness* ($\text{Shape} - \text{Compactness}$) festgelegt werden. Im Zuge dieser Arbeit wird die *Shape* sehr gering gewählt, da der Hauptaugenmerk zur Brandflächendetektion auf den spektralen Eigenschaften der Brandfläche basiert. Die Kriterien *Shape* und *Compactness* dienen generell dazu Objekte, die sich spektral nur gering voneinander abheben, jedoch stark unterschiedliche Formparameter aufweisen, zu unterscheiden. Es können jedoch keine besonderen Formparameter einer Brandfläche festgestellt werden, was sich in einer hohen Gewichtung der *Color* und geringen Gewichtung der *Compactness* widerspiegelt. Die *Multiresolution Segmentation* bietet außer der Berücksichtigung der spektralen Werte den Vorteil, dass sich die verschiedenen Bänder eines Satellitenbildes unterschiedlich gewichten lassen, sie also die Segmentierung somit unterschiedlich stark beeinflussen. Wie bereits unter Punkt 3.1.1 und 5.1.2 gezeigt ist die spektrale Rückstrahlung einer Brandfläche im nahen und mittleren Infrarot am höchsten, weshalb auch die Band-Gewichtung im nahen und mittleren Infrarot höher definiert wird als im grünen und roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Die Wahl des richtigen Segmentierungsmaßstabes hängt sowohl von der Auflösung der jeweiligen Satellitenbildszene, als auch von ihrer Landbedeckung ab. Der Segmentierungsmaßstab kann deswegen von Szene zu Szene variieren, je nachdem ob es sich um eine homogene (große Objekte auch bei kleinem Segmentierungsmaßstab), oder heterogene (kleine Objekte auch bei größerem Segmentierungsmaßstab) Satellitenbildszene handelt. Für die Segmentierung der SPOT 5 Satellitenbilder von Griechenland und La Palma wird ein relativ geringer

Segmentierungsmaßstab zur Generierung des ersten Segmentierungslevels (*Basislevel*) gewählt. Aufbauend auf diesem kleinmaßstäbigen, feinen *Basislevel* wird ein weiteres Level, das Level *Brandflächendetektion*, mit größeren Objekten erzeugt. Dafür wird ein zweiter Segmentierungsalgorithmus, die *Spectral Difference Segmentation* gewählt. Dieser Segmentierungsalgorithmus fasst benachbarte Objekte auf Grundlage ihrer mittleren Intensitätswerte zusammen, bis der vom Nutzer vorgegebene Schwellwert erreicht wird (Definiens AG 2010). Die *Spectral Difference Segmentation* kann nur auf einem bereits bestehenden Segmentierungslevel angewandt werden und dient dazu, spektral ähnliche Objekte zusammenzufassen und damit größere, homogene Bildbereiche zu schaffen (Definiens AG 2010). Diese beiden Segmentierungsschritte werden gewählt, um so einfach, schnell (*rapid mapping*) aber auch so genau wie möglich homogene Bildbereiche erfassen, und einzelne, nicht verbrannte Gebiete innerhalb der Brandfläche erkennen zu können.

Im Zuge des multitemporalen Verfahrens gilt es außerdem zu entscheiden, nach welchen Kriterien das pre-Bild segmentiert wird. Dafür stehen laut Niemeyer et al. 2008 drei verschiedene Methoden zur Auswahl. Als erste Möglichkeit kann auf der Basis eines bi-temporalen Datensatzes segmentiert werden. Als zweite Möglichkeit bietet es sich an die Daten basierend auf einem Aufnahmezeitpunkt zu segmentieren und die generierten Objektgrenzen auf das zweite Satellitenbild zu übertragen. Die dritte Möglichkeit ergibt sich darin, beide Satellitenbildszenen unabhängig voneinander zu segmentieren. Verwendet man das Verfahren eins oder zwei, haben die Objekte der beiden Satellitenbilder die gleichen geometrischen Eigenschaften und Veränderungen können ausschließlich in der Reflexion erkannt werden. Bei der dritten Variante verändert sich zusätzlich auch die Geometrie und alle objekt-bezogenen Merkmale des Programmes *eCognition Developer* können verwendet werden (Niemeyer et al. 2008). Im Falle des Katastrophenmanagements ist jedoch ausschließlich die Geometrie des Post-Bildes ausschlaggebend. Im Zuge dieser Arbeit wird daher das Verfahren eins verwendet. Auch im Hinblick des *rapid mapping* ist es sinnvoller gleiche Objekte zu generieren, da bei großen Satellitenbildszenen sonst zu viele Objekte generiert werden, die das Programm bei einer Veränderungsanalyse nur unter langen Zeitspannen oder gar nicht mehr, verarbeiten kann.

5.1.7 Klassifikation

Wie bereits mehrfach in dieser Arbeit erwähnt worden ist, soll der generierte Algorithmus so schnell wie möglich durchführbar sein. Deswegen wird auch bei der Klassifikation darauf geachtet, so wenig Klassifikationsschritte, Indices und Schwellwerte wie möglich zu verwenden. Zu Beginn wird eine Normalisierung durchgeführt, um Daten verschiedener radiometrischer Auflösung (zum Beispiel 8bit oder 16bit) mit ähnlichen Schwellwerten klassifizieren zu können. Dazu wird, basierend auf den Objekten des ersten Levels, von den Bändern zwei bis vier sowohl der Minimal- als auch der Maximalwert ermittelt. Mit Hilfe der Formel 5.2 können die Rückstrahlwerte von Null bis Eins skaliert, und somit vergleichbar gemacht werden.

$$\text{Normalisierung} = \frac{\text{Mittelwert}(\text{Kanal}_x) - \text{Minimum}(\text{Kanal}_x)}{\text{Maximum}(\text{Kanal}_x) - \text{Minimum}(\text{Kanal}_x)} \quad 5.2$$

Aufbauend auf diesen normalisierten Rückstrahlwerten werden die benötigten Indices zur Brandflächendetektion (siehe Punkt 5.1.2) in der *Software eCognition Developer* berechnet. Die Klassifikation kann in der *Software* direkt im Prozessbaum durchgeführt werden, oder über die Klassenbeschreibung (*class description*) mit den notwendigen Bedingungen definiert werden. Um den Vorteil der *Fuzzy-Logic* (siehe Punkt 3.1.4) nutzen zu können, werden die verschiedenen Bedingungen in die Klassenbeschreibung eingebaut. Welche Klassen im Zuge der Brandflächendetektion entstehen, wird im Folgenden näher erläutert.

5.1.7.1 Ausmaskieren der nicht verbrannten Gebiete

Als ersten Klassifikationsschritt (siehe Abbildung 5-5) werden die nicht verbrannten Gebiete des Satellitenbildes ausmaskiert, um eine spätere Fehlklassifikation spektral ähnlicher Bereiche wie Wasserflächen, Freiflächen, oder Sonnenspiegelungen in Wasserflächen zu verhindern (Martín et al. 1999). Wie bereits unter Punkt 3.1.4 näher erläutert besitzt die *Software eCognition Developer* den großen Vorteil der *Fuzzy-Logic*. Dieses Verfahren wird für die gesamte Klassifikation angewandt. Nach Stroppiana et al. 2009 erbringt die *Fuzzy-Logic* in Kombination aus mehreren Indices das beste Klassifikationsergebnis zur Brandflächendetektion. Die Zuweisung zu den einzelnen Klassen erfolgt durch die Bildung so genannter Schwellwerte. Diese Schwellwerte variieren je nach Satellitenbild, Sensor und Untersuchungsgebiet. Da also keine allgemeingültigen Schwellwerte zur Brandflächendetektion gegeben werden können, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, die verwendeten, exakten Werte aufzuzählen. Die Schwellwerte können dank der *Fuzzy-Logic* nicht nur einen Wert, sondern einen Wertebereich umfassen. Innerhalb dieses Wertebereiches entscheidet das Programm anhand der Merkmalsdefinitionen der Klassen die Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit zu den einzelnen Klassen. Die erzeugten Wahrscheinlichkeiten von Null bis Eins (entspricht Null bis 100 Prozent) erleichtern die Schwellwertfindung und dienen zur Evaluation des Klassifikationsergebnisses. Um die nicht verbrannten Gebiete auszumaskieren werden der *MSAVI* und der *NDSWIR* (siehe Punkt 5.1.4) verwendet. Der *MSAVI*-Wert der nicht verbrannten Gebiete ist signifikant höher als der *MSAVI*-Wert der Brandfläche. Dies resultiert daraus, dass es sich beim *MSAVI* um einen Vegetationsindex handelt, der umso höher ist, je mehr vitale Vegetation vorhanden ist. Verbrennt die vorhandene Vegetation, erklärt dies die sehr niedrigen Indicewerte einer Brandfläche im Vergleich zu den bewachsenen Bereichen. Um auch Bereiche ohne Vegetation, wie Freiflächen, urbane Gebiete oder Wasser von der Brandfläche unterscheiden zu können, wird der zweite Index, der *NDSWIR* benötigt. Wie bereits unter Punkt 5.1.2 gezeigt wurde weist die Brandfläche im mittleren Infrarot höhere Rückstrahlwerte auf als in

allen anderen Klassen, weswegen mit Hilfe des *NDSWIR* zwischen der Brandfläche und nicht verbrannten Bereichen ohne Vegetation unterschieden werden kann. Die nicht verbrannten Gebiete weisen signifikant höhere Werte im *NDSWIR* auf als die Brandfläche. Die verwendeten Schwellwerte werden anhand von Expertenwissen in einem iterativen Prozess bestimmt.

Wie Abbildung 5-6 verdeutlicht werden in diesem ersten Ausmaskierungsschritt die Meisten nicht verbrannten Bereiche des Satellitenbildes richtig klassifiziert. Sowohl Wolken, Wolkenschatten, Vegetation, Freifläche als auch Wasserbereiche (Meer und Binnengewässer) werden somit unter der Klasse „*nicht verbrannt*“ zusammengefasst. Herauszustellen ist, dass mit Hilfe des mittleren Infrarots und des daraus berechneten *NDSWIR* einer Brandfläche spektral ähnliche Gebiete als nicht verbrannt erkannt werden können, was die Fehlklassifikation dieser Bereiche im Vergleich zum bestehenden *Fire-Tool* deutlich reduziert.

5.1.7.2 Ausmaskieren der Wolkenschatten, Küstenbereiche und dunklen Gesteine

Wie bereits erwähnt, weisen Küstenbereiche und Wolkenschatten ähnliche spektrale Eigenschaften wie die Brandfläche auf (Martín et al. 1999). Einige, vor allem sehr kleine unverbrannte Bereiche an der Küste, Wolkenschatten innerhalb der Brandfläche, und sehr dunkles Gestein, sind noch nicht durch die Klasse „*nicht verbrannt*“ erfasst worden. Deswegen werden in einem nächsten Schritt diese Bereiche ausmaskiert und unter der Klasse „*Wolkenschatten, Küste und dunkles Gestein*“ zusammengefasst. Wie unter Punkt 5.1.3 bereits gezeigt, lässt sich die Brandfläche im mittleren Infrarot am Besten von allen anderen Klassen unterscheiden. Deswegen wird zur Klassifikation dieser Bereiche ein Schwellwert des normalisierten mittleren Infrarots (*Norm_SWIR*) gewählt. Alle Objekte, die einen Wert aufweisen, der kleiner als der definierte Schwellwert ist, werden der Klasse „*Wolkenschatten, Küste und dunkles Gestein*“ zugeordnet. Diese Bereiche sind im mittleren Infrarot so deutlich voneinander zu trennen, dass keine weiteren Indices zur Klassifikation nötig sind, sondern dass sich ein harter Schwellwert des normalisierten mittleren Infrarots als ausreichend erweist.

Die ersten beiden Ausmaskierungsschritte sind sowohl für monotemporale als auch für multitemporale Analysen identisch, und sind an den Brandflächen von Griechenland und La Palma entwickelt worden.

5.1.7.3 Ausweisen der Brandfläche

Der dritte Schritt zur Brandflächendetektion, die eigentliche Klassifikation der Brandfläche, ist für monotemporale und multitemporale Analysen unterschiedlich, und basiert auf zwei verschiedenen Verfahren. Je nachdem, welche Datengrundlage zur Verfügung steht, kann in der Benutzerschnittstelle das passende Verfahren ausgewählt werden. Das genaue Vorgehen

in der Benutzerschnittstelle wird unter Punkt 5.1.8 erläutert. Im Folgenden werden das Verfahren zur monotemporalen Brandflächendetektion und anschließend das multitemporale Verfahren näher beschrieben.

Monotemporal

Das monotemporale Verfahren zur Brandflächendetektion wird anhand des SPOT 5 Satellitenbildes vom 25.08.2009, das den Waldbrand in der Region Grammatiko, in Griechenland abbildet, entwickelt. Die Übertragbarkeit der Methode auf andere Gebiete wird unter Punkt 5.1.9 näher beschrieben. Wie bereits bei der Ausmaskierung der nicht verbrannten Gebiete näher dargestellt, wird auch die Brandfläche auf Basis der *Fuzzy-Logic* ausgewiesen. Dafür werden die drei Indices *BAI*, *MSAVI* und *NDSWIR* verwendet. Wie bereits unter Punkt 5.1.4 gezeigt ist der *BAI* speziell zur Brandflächendetektion entwickelt worden. In den Bereichen des Brandes weist dieser Index sehr hohe Werte auf, wohingegen in unverbrannten Bereichen die Werte gering sind. Wie bereits erwähnt, weist der *MSAVI* über Brandflächen einen sehr geringen Wert auf. So können in umgekehrter Weise zum Ausmaskieren der Vegetation die niedrigen Werte des *MSAVI* dazu verwendet werden die Brandfläche zu erfassen. Ebenso verhält es sich mit den Werten des *NDSWIR*, wobei die niedrigen Werte des *NDSWIR* zur Brandflächendetektion benutzt werden. Die Schwellwerte werden wiederum in einem iterativen Prozess ermittelt. Die Brandfläche kann räumlich genau erfasst werden, kein Wolkenschatten wird irrtümlicherweise als Brandfläche fehlklassifiziert. Jedoch werden kleine Objekte, bei denen es sich um Freiflächen oder urbane Bereiche (vor allem Straßen) handelt, teilweise fälschlicherweise als Brandfläche klassifiziert. Die Fehlklassifikation dieser spektral ähnlichen Bereiche erwähnen auch Martín et al. 1999 und Pereira et al. 1999. Um diese kleinen Flächen zu eliminieren werden kontextbezogene Nachbarschaftsinformationen zur Klassifikation herangezogen. So ist es nach Kasischke et al. 1993 unwahrscheinlich, dass in großer Entfernung zur Hauptbrandfläche sehr kleine verbrannte Objekte auftreten. Um diesen Gedankengang zu verwenden werden zunächst alle aneinander angrenzenden Objekte der Klasse „*verbrannt*“ zusammengefasst. Dadurch ergibt sich eine sehr große Brandfläche, die von zahlreichen kleinen verbrannten Flächen umgeben ist. Nun wird ein Flächenschwellwert eingeführt. Alle Objekte, die unter diesem Wert liegen, werden der Klasse „*kleine Flächen*“ zugeordnet.

Anschließend werden alle kleinen Flächen, die sich näher als der definierte Schwellwert an der Klasse „*verbrannt*“ befinden, der Klasse „*verbrannte kleine Flächen*“ zugewiesen. Um kontrollieren zu können, welche Objekte in diesem Schritt erfasst werden, wird die Zwischenklasse „*verbrannte kleine Flächen*“ eingeführt (siehe Abbildung 5-4). Die dieser Klasse zugewiesenen Objekte werden erst in einem finalen Schritt, wenn das Klassifikationsergebnis den Nutzer zufrieden stellt, wieder der Klasse Brandfläche zugewiesen.

Abbildung 5-6 verdeutlicht das finale Klassifikationsergebnis. Um das Ergebnis visuell vergleichen zu können, ist parallel das SPOT 5 Satellitenbild der Brandfläche dargestellt. Der

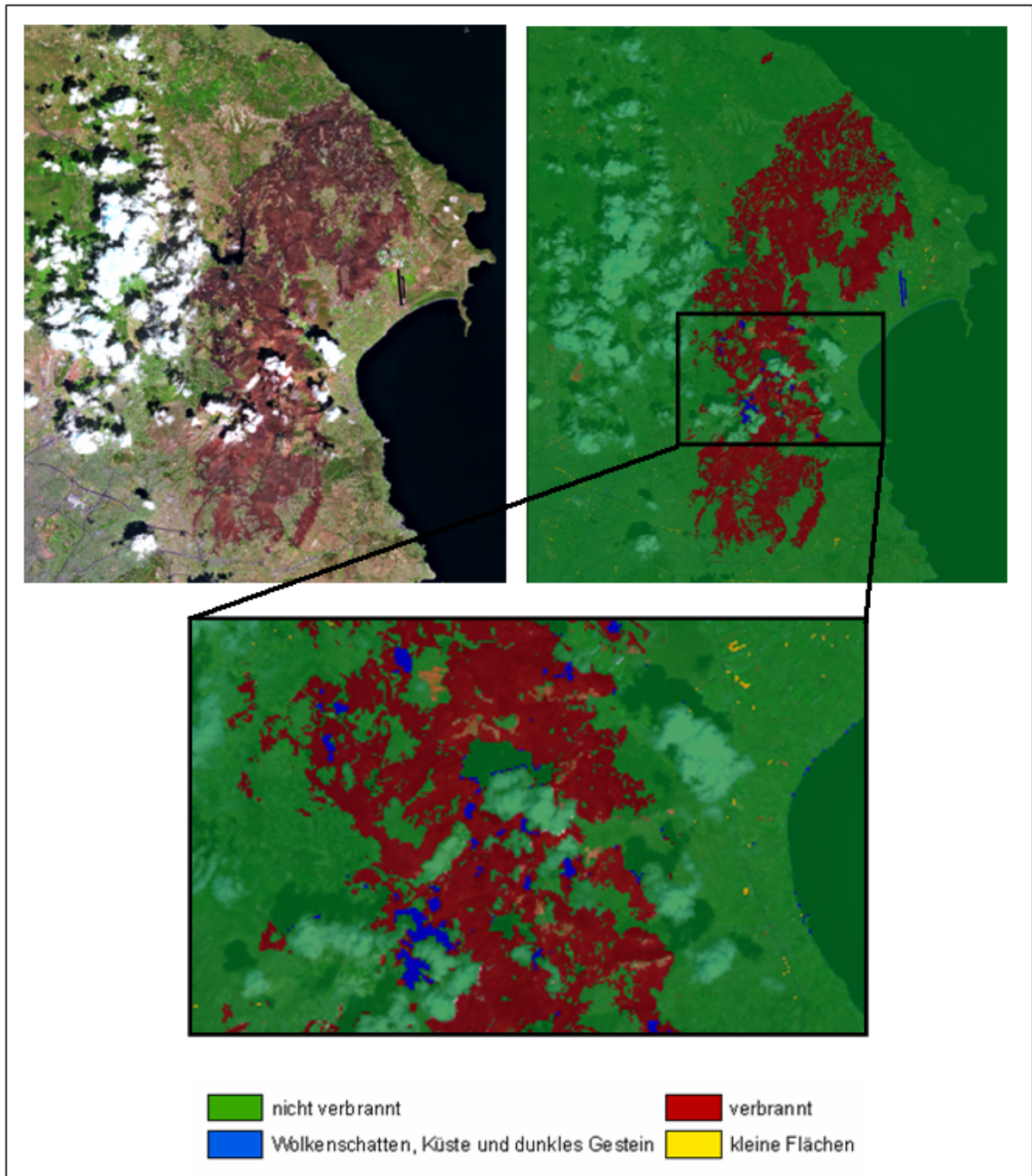


Abbildung 5-6: Klassifikationsergebnis des optischen, monotemporalen Algorithmus, eigene Darstellung
 bewölkter Bereich der Brandfläche wird in einem vergrößerten Ausschnitt noch einmal extra dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass fast keine Wolkenschatten oder Küstenbereiche als Brandfläche fehlklassifiziert sind.

Das Verfahren zur monotemporalen Brandflächendetektion liefert ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Es wird nicht nur die Hauptfläche des Brandes gut erkannt, sondern auch kleine,

nicht verbrannte Flächen innerhalb und kleine verbrannte Flächen außerhalb dieser Fläche können erfasst werden. Es kommt zu fast keiner Fehlklassifikation von Wolkenschatten, Wasserbereichen oder urbanen Bereichen.

Multitemporal

Das entwickelte monotemporale Verfahren zur Brandflächendetektion wird auf die SPOT 5 Satellitenbildszene der Waldbrände von La Palma übertragen. Die einer Brandfläche ähnlichen spektralen Reflexionseigenschaften des Lavagesteins (siehe Punkt 2.3.2) führen jedoch dazu, dass keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden können. Das dunkle Lavagestein im Süden der Insel kann nicht von der Brandfläche getrennt werden, so dass zu viele Objekte als Brandfläche ausgewiesen werden. Dies macht das Entwickeln eines weiteren Algorithmus nötig, um auch in spektral besonderen Gebieten eine rasche Erkennung der Brandflächen zu ermöglichen. Pereira et al. 1999 und Stroppiana et al. 2009 empfehlen im Zuge einer Verwechslung der Brandfläche mit anderen Landbedeckungsarten eine multitemporale Analyse, da sich diese effektiver erweist als eine monotemporale. Wie bereits unter Punkt 3.1.4 gezeigt, gibt es verschiedene Möglichkeiten eine Veränderungsanalyse durchzuführen. Die Differenz der ausgewählten Indices (*MSAVI*, *BAI*, *NDSWIR*) ist eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Erkennung von Vegetations- und Waldbedeckungsänderungen und somit zur Brandflächendetektion (Kasischke et al. 1993, Martín & Chuvieco 1995, Stroppiana et al. 2009, Boer et al. 2008, Miller & Thode 2007). Hierbei werden die einzelnen Indices für die generierten Objekte jedes Satellitenbildes berechnet, und auf dieser Basis das pre-Bild vom post-Bild abgezogen. Dieses Verfahren ist zur Brandflächendetektion mit multitemporalen Daten besser geeignet als zum Beispiel die *Post Classification* Veränderungsanalyse oder die *PCA* Analyse, weil es übertragbar ist und bessere Klassifikationsergebnisse verspricht (García & Chuvieco 2004, Kennedy et al. 2009). So liegt ein großer Vorteil des Verfahrens darin, dass die Unterschiede in den spektralen Eigenschaften der Objekte herausgestellt werden, und die Topographischen- und Einstrahlungseffekte vermindert werden (Lu et al. 2004).

Die Ausmaskierung der nicht verbrannten Gebiete basiert auf dem post-Bild und wird auf das pre-Bild übertragen. Bei allen im post-Bild ausmaskierten Gebieten handelt es sich um keine Brandfläche, so dass diese Objekte auch im pre-Bild nicht von Bedeutung sind. So kann eine Veränderung, die sich in diesen Bereichen ereignet hat (zum Beispiel Rodung oder Windwurf), im vorhinein ausmaskiert, und eine Fehlklassifikation verhindert werden. Die Ausmaskierung der nicht verbrannten Gebiete wird genauso durchgeführt wie es bereits im monotemporalen Verfahren erörtert wurde.

Ähnlich zur monotemporalen Brandflächendetektion werden auch bei der multitemporalen Analyse die Indices *BAI*, *MSAVI*, *NDSWIR* und das normalisierte mittlere Infrarot verwendet. Allerdings werden hier die Indices in Form einer Veränderungsanalyse angewandt, sie werden also für die identischen Objekte im post und pre Bild separat berechnet und dann von einander subtrahiert. So entstehen die Indices *dBAI* ($BAI_{post} - BAI_{pre}$), *dMSAVI* ($MSAVI_{post} -$

MSAVI pre), *dNDSWIR* (*NDSWIR* post – *NDSWIR* pre) und *d_norm_SWIR* (normalisiertes mittleres Infrarot post – normalisiertes mittleres Infrarot pre). Die Brandflächendetektion auf Basis der Veränderungsanalyse basiert auf dem Gedanken, dass sich der Bereich der Brandfläche in beiden Satellitenbildern am stärksten im Gegensatz zum Rest des Satellitenbildes verändert, da die vorher herrschende Bedeckung durch den Waldbrand zerstört wird. Die bereits vorgenommene Geometrische- und Atmosphärenkorrektur kann ausschließen, dass störende Einflüsse der Atmosphäre oder Lageungenauigkeiten der Satellitenbilder eine nicht vorhandene Veränderung anzeigen und diese Bereiche irrtümlicherweise als Brandfläche ausgewiesen werden. Jedoch kann eine 100% Übereinstimmung von zwei Bildern nie gewährleistet werden. Deswegen muss ein Schwellwert festgelegt werden, ab dem die angezeigte Veränderung als Brandfläche ausgewiesen werden soll. Die richtigen Schwellwerte sind in einem iterativen Prozess zu ermitteln. Die Möglichkeit, dass Objekte fälschlicherweise als Brand klassifiziert werden, die sich durch anthropogenen (zum Beispiel Rodung), oder natürlichen (zum Beispiel Windwurf) Einfluss verändert haben, wird durch die Verwendung des *dBAI* Index ausgeschlossen. Dieser Index weist hohe Werte bei Brandflächen auf, jedoch niedrige Werte wenn sich Objekte anderweitig in ihrer Bedeckung verändern. Die Brandfläche lässt sich somit dadurch charakterisieren, dass sie gegenüber anderen Landbedeckungsarten hohe Werte des *dBAI*, negative Werte des *dMSAVI*, und hohe Werte des *dNDSWIR* und *d_norm_SWIR* aufweist.

Ausweisen des Verbranntheitsgrades

Im Falle Multitemporaler Daten kann die Brandfläche nicht nur ausgewiesen werden, sondern es kann auch eine Aussage bezüglich der Schwere des Verbrennungsgrades getroffen werden. Bis jetzt konnte sich in der Literatur noch keine klare Definition für den Grad der Verbrennung durchsetzen. Jedoch wird damit meist das Ausmaß der Veränderung das ein Feuer auf ein Ökosystem ausübt, beschrieben (Agee 1993, Sugihara et al. 2006, Key & Benson 2006). Die Einteilung des Verbranntheitsgrades richtet sich hauptsächlich nach Key & Benson 2006, die anhand von Landsat Satellitenbildszenen das *normalized burn ratio* (*NBR*) und daraus abgeleitet den *dNBR* (*NBR* post – *NBR* pre) entwickelt haben. Mit Hilfe von Feldmessungen können drei verschiedene Stufen des Verbrennungsgrades ausgewiesen werden: *gering*, *mittel* und *hoch*. Die Einteilung in drei Klassen wird von den meisten Autoren übernommen (Fox et al. 2008, Norton et al. 2009, Boer et al. 2008, De Santis & Chuvieco 2007). Je höher der *dNBR* Wert, umso stärker ist nach Key & Benson 2006 der Grad der Verbrennung. Miller & Thode 2007 geben jedoch zu bedenken, dass der Verbrennungsgrad vor allem von der Ausgangsvegetation abhängt. So ist der Anteil der Vegetation pro Fläche, und wie stark diese vom Feuer betroffen ist, ausschlaggebend. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Ein Gebiet, das nur Gestrüpp enthält und komplett abbrennt müsste den höchsten Verbrennungsgrad aufweisen. Nach der Berechnung von Key & Benson 2006 besitzt sie jedoch einen geringeren *dNBR* Wert als eine Fläche mit viel Vegetation, bei der jedoch nicht die ganze Masse abgebrannt ist (Miller & Thode 2007). Diese Feststellung gilt es auch im Zuge dieser Diplomarbeit zu berücksichtigen.

Im Falle des Satellitenbildpaares von La Palma fällt nach ersten Klassifikationsversuchen auf, dass je nach Schwellwert nur ein geringer Teil der Brandfläche richtig klassifiziert wird, oder aber viele unverbrannte Objekte fälschlicherweise als Brand klassifiziert werden. Nach einer genaueren Gebietsuntersuchung mit Hilfe von Google Earth und den Landbedeckungsklassen von CORINE stellt sich heraus, dass es sich bei den gut erfassbaren Gebieten vorwiegend um Nadelwälder mit üppiger Vegetation handelt. Die restlichen schwerer erfassbaren Gebiete hingegen sind mit spärlicher Vegetation oder Hartlaubbewuchs bewachsen. Diese spärlich bewachsenen Gebiete weisen im Vergleich zu unverbrannten Freiflächen keine starken spektralen Unterschiede auf, da nicht genug Vegetation vorhanden ist, die diesen Unterschied hervorrufen könnte. Im Zuge des Klassifikationsprozesses wird deutlich, dass sich der *dbAI* zur Unterscheidung dieser verschiedenen Flächen am Besten eignet. Nach „leicht“ und „stark“ verbrannt kann jedoch nicht im Sinne von komplett zerstörter Vegetation unterschieden werden. Auch die leicht verbrannte Vegetation ist komplett abgebrannt und weist somit die höchste Verbrennungsstufe auf (Miller & Thode 2007). Der Verbranntheitsgrad richtet sich in dieser Arbeit nach der Erkennbarkeit der Brandflächen, und damit nach der Masse der verbrannten Vegetation. Somit wird ebenfalls der Verbranntheitsgrad nach Key & Benson 2006 berücksichtigt. Hier wird bestätigt, dass der Verbrennungsgrad nach dem tatsächlichen Verlust von Vegetation, also in Masse, definiert werden kann.

Zur Unterscheidung von stark und leicht verbranntem Gebiet eignet sich der *dbAI* am besten, da dieser Indize umso höhere Werte anzeigt, je mehr Vegetation verbrennt. Aufgrund nicht vorhandener Referenzflächen, und den besonderen naturräumlichen Gegebenheiten La Palmas (siehe Punkt 2.3.2) kann jedoch nicht zu 100 % „stark verbrannt“ von „leicht verbrannt“ von „nicht verbrannt“ unterschieden werden. Visuell sind die stark verbrannten Bereiche dunkler als die leicht verbrannten Bereiche. Jedoch weisen einige spärlich bewachsene Bereiche fast die gleiche Farbe auf wie leicht verbrannte Gebiete, so dass oftmals eine optische Differenzierung der Brandfläche von nicht verbrannten Gebieten nicht gegeben ist. Unter Anbetracht von *Google Earth* und dem Geländere relief fällt jedoch auf, dass die spärlich bewachsenen spektral sehr ähnlichen, nicht verbrannten Gebiete oft an einer Klippe unterhalb der Brandfläche liegen. Der Brand hätte somit einen Geländesprung machen müssen, was wiederum in Bezug auf Funkenflug jedoch nicht komplett auszuschließen ist. Da keine Referenzdaten zur Verfügung stehen, wird sich bei der Schwellwertfindung zur Einteilung in „leicht verbrannt“ und „stark verbrannt“ auf den visuellen Vergleich, und auf die stark unterschiedlichen spektralen Reflexionswerte verlassen. Die leicht verbrannten Gebiete sind am Besten mit dem *dbAI* und dem *d_{norm_swir}* zu detektieren, wohingegen die stark verbrannten Gebiete mit dem *dbAI*, dem *dMSAVI* und dem *dNDSWIR* am Besten zu erfassen sind. Sowohl der *dMSAVI* als auch der *dNDSWIR* reagieren sensibel auf Vegetation. Da in den spärlich bewachsenen Gebieten nicht so viel Vegetation abbrennen kann wie in den dicht bewachsenen Gebieten, lässt es sich gut erklären, dass diese Bereiche am Besten mit dem speziell für Brandflächen entwickelten *dbAI* und dem Vergleich des mittleren Infrarots, in dem die Brandfläche die höchste Reflexion aufweist, erfasst werden können. Ohne die

Einteilung der Brandfläche in die zwei Klassen „*leicht verbrannt*“ und „*stark verbrannt*“ wäre die Brandflächendetektion nur mit einer größeren Fehlklassifikation möglich gewesen. Außerdem stellt sich in einer weiteren Analyse mit TerraSAR-X Daten heraus, dass diese lediglich die stark verbrannten Bereiche erfassen kann, die leicht verbrannten Gebiete hingegen nicht erkannt werden können (siehe Punkt 5.2). Eine Unterscheidung in „*stark*“ und „*leicht*“ verbrannt kann im multitemporalen Algorithmus das Klassifikationsergebnis verbessern.

Ausweisen der stark verbrannten Gebiete

Um eine Fehlklassifikation sehr kleiner und spektral ähnlicher Objekte zu vermeiden wird für die Klasse „*stark verbrannt*“ sowohl ein Flächenschwellwert als auch ein Schwellwert der maximalen gemeinsamen Grenze der Objekte „*stark verbrannt*“ und „*Wolkenschatten, Küste und dunkles Gestein*“ eingeführt. Diese Schwellwerte sind vordefiniert und müssen nicht auf jedes Satellitenbild angepasst werden. Möchte der Nutzer diese Werte jedoch verändern, kann er dies in der Klassenbeschreibung (*clas description*) der Klasse „*stark verbrannt*“ durchführen. Nur Objekte, die über dem definierten Flächenschwellwert und unter dem definierten Grenzwert liegen, können der Klasse „*stark verbrannt*“ zugeordnet werden. Wie bereits erwähnt eignet sich der *dbAI* hervorragend zum Ausweisen von Brandflächen, und wird außerdem zur Unterscheidung zwischen „*stark verbrannt*“ und „*leicht verbrannt*“ benötigt. So können nur Objekte als „*stark verbrannt*“ ausgewiesen werden, deren *dbAI* Wert den definierten Schwellwert überschreiten. Als weitere Indices zur Brandflächendetektion werden der *dMSAVI* und der *dNDSWIR* verwendet. Die *dMASVI* Werte weisen bei der Brandfläche stark negative Werte auf, so dass nur Werte, die unter dem

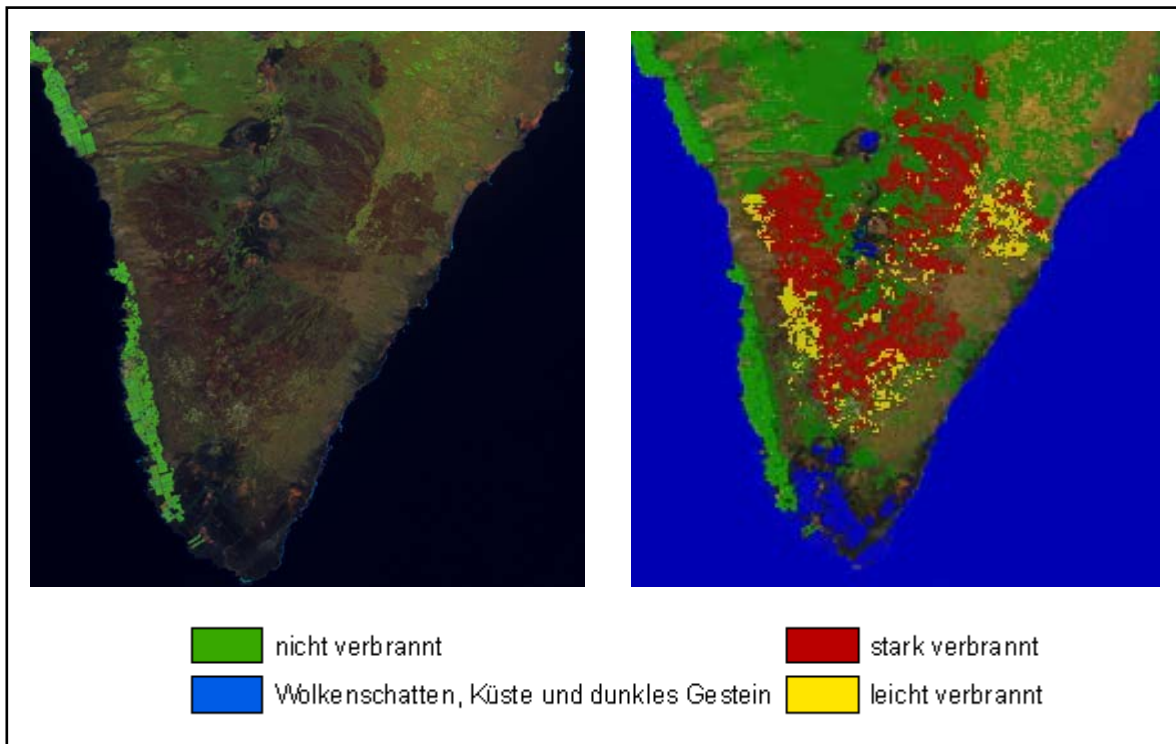


Abbildung 5-7: Klassifizierte Brandfläche in La Palma, eigene Darstellung

definierten Schwellwert liegen, als Brandfläche klassifiziert werden können. Ebenso verhält es sich mit den *dNDSWIR* Werten, die über der Brandfläche im Gegensatz zum Rest des Satellitenbildes negative Werte aufweisen. Abbildung 5-7 zeigt die klassifizierte Brandfläche von La Palma. Dabei werden sowohl die stark verbrannten als auch die leicht verbrannten Gebiete dargestellt. Zur besseren Visualisierung ist ebenfalls das SPOT 5 Satellitenbild La Palmas abgebildet.

Ausweisen der leicht verbrannten Gebiete

Die leicht verbrannten Gebiete unterscheiden sich von den nicht verbrannten Gebieten durch einen höheren *dbAI*, der jedoch niedriger ist als der *dbAI* Index der stark verbrannten Gebiete. Im Gegensatz zu den restlichen Bereichen des Satellitenbildes zeichnen sich die leicht verbrannten Gebiete durch einen niedrigeren normalisierten mittleren Infrarotwert aus. Dies bestätigt die unter Punkt 3.1.1 und Punkt 5.1.2 beschriebene Reflexion der Brandfläche. Hier wurde festgestellt, dass die Rückstrahlung im Vergleich zum pre-Bild in dicht bewachsenen Gebieten im mittleren Infrarot ansteigt, in spärlich bewachsenen Gebieten jedoch zurückgeht. Von allen vier Bändern reflektiert die Brandfläche im post-Bild im vierten Band trotz geringem Rückgang im Vergleich zum pre-Bild am Stärksten, und eignet sich somit am Besten um auch die leicht verbrannten Gebiete La Palmas von den spektral sehr ähnlichen Frei- und Felsflächen zu unterscheiden. Um eine Fehlklassifikation von leicht verbrannten Gebieten zu vermeiden, wurden zwei Entfernungsschwellwerte eingeführt. Diese Schwellwerte sind ebenfalls vordefiniert und müssen nicht zwingend für jedes Satellitenbild neu definiert werden. Der erste Entfernungsschwellwert beruht darauf, dass es sehr unwahrscheinlich ist, leicht verbrannte Gebiete in großer Entfernung zu stark verbrannten Gebieten aufzufinden. So können nur Objekte, die unter dem gewählten Schwellwert liegen, der Klasse „leicht verbrannt“ zugewiesen werden. Der zweite Schwellwert gibt einen Mindestabstand vor, den leicht verbrannte Objekte zur Klasse „Wolkenschatten, Küste und dunkles Gestein“ aufweisen müssen, um eine Fehlklassifikation von spektral ähnlichen Objekten zu vermeiden.

Zusammenfassend lässt sich sowohl zum monotemporalen als auch zum multitemporalen Algorithmus feststellen, dass sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Das Verwenden drei unterschiedlicher Indices und damit einer geringen Anzahl von Schwellwerten garantiert eine schnelle Umsetzung des Algorithmus. Sowohl unverbrannte Bereiche innerhalb der Brandfläche als auch verbrannte Bereiche außerhalb der Hauptbrandfläche können erkannt werden. Eine Fehlklassifikation von spektral ähnlichen Bereichen wie Wolkenschatten, Freiflächen, Felsen, sehr dunkeln Gesteinen oder Küstenbereichen kann mit Hilfe des mittleren Infrarots reduziert werden.

5.1.8 Benutzerschnittstelle

Zur schnellen Umsetzung und leichteren Bedienung des Algorithmus ist es eine weitere

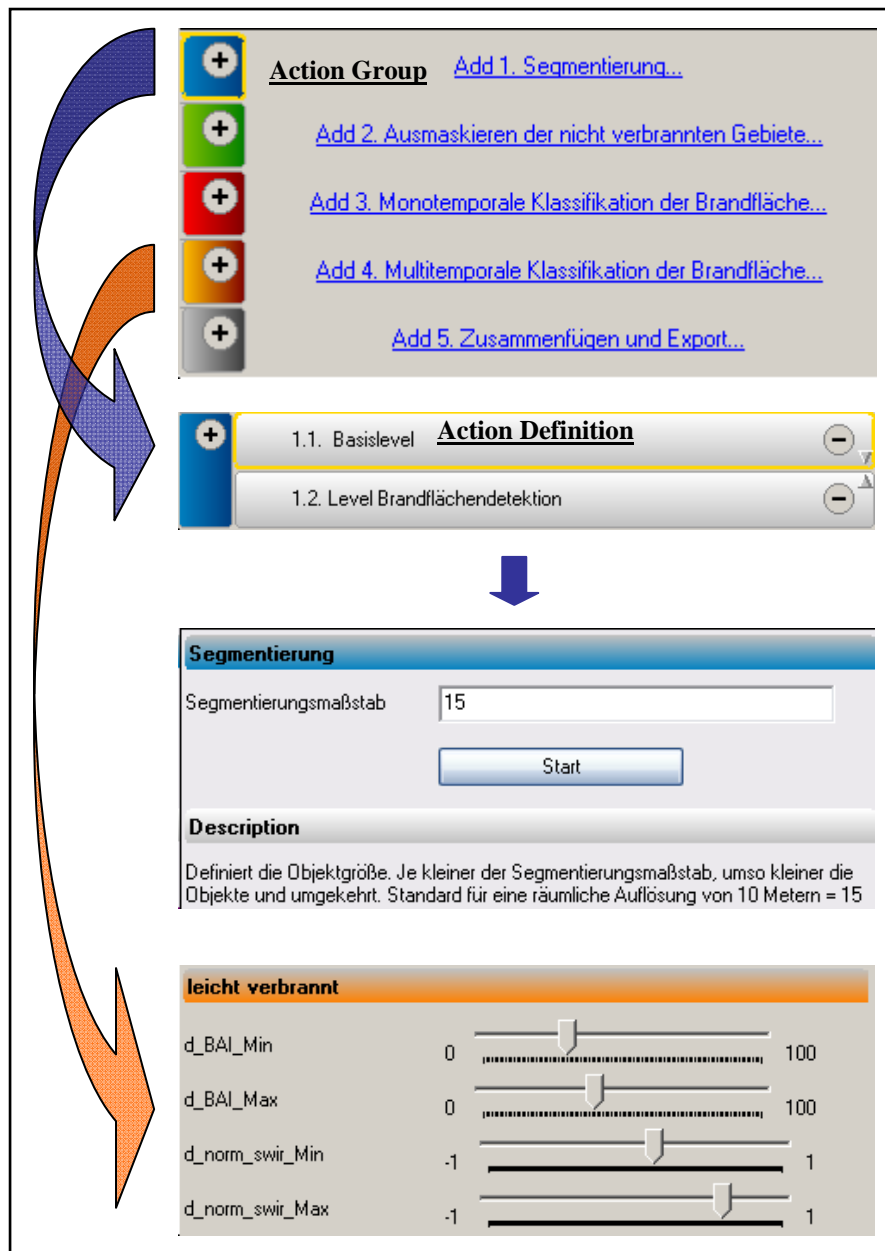


Abbildung 5-8: Action Library, eigene Darstellung

Brandflächendetektion umfasst die *Action Library* fünf *Action Groups*. Abbildung 5-8 verdeutlicht dies. Diese *Action Groups* sind wiederum unterteilt in so genannte *Action Definitions*, die vom Nutzer selbst ausgewählt werden können. Dabei müssen jedoch je nach Verfahren nicht zwingend alle *Action Definitions* zum Einsatz kommen. So kann der Nutzer selbst entscheiden, ob er den Algorithmus basierend auf monotemporalen oder auf multitemporalen Daten zur Brandflächendetektion verwenden möchte. Der Segmentierungsmaßstab und die einzelnen Schwellwerte können über Regler verändert werden, was die notwendigen Anpassungen an verschiedene Satellitenbilder erheblich

Aufgabe dieser Diplomarbeit eine Benutzerschnittstelle zu generieren. Da im operationellen Dienst verschiedene Mitarbeiter mit diesem Algorithmus arbeiten ist eine Grundvoraussetzung die intuitive Bedienbarkeit. Die Benutzerschnittstelle wird mit Hilfe des *eCognition Architect* umgesetzt. Der *eCognition Architect* ist bereits in dem zur Verfügung gestellten Softwarepaket *eCognition Developer* implementiert. Die Benutzerschnittstelle basiert auf der so genannten *Action Library*, die wiederum in einzelne *Action Groups* eingeteilt ist. Für den in dieser Arbeit generierten Algorithmus zur optischen

beschleunigt. Um zu garantieren, dass die veränderten Schwellwerte immer wieder aktualisiert werden, wird jeder Wert einzeln mit dem Prozessbaum verknüpft. Durch Betätigen des *Start* Knopfes kann die Klassifikation beliebig oft wiederholt werden. Um falsch Klassifizierte Objekte zu berichtigen, ist ferner eine manuelle Editierfunktion eingebaut. Zum schnelleren Export der detektierten Brandfläche ist eine Funktion integriert, mit dieser der Speicherplatzort ausgewählt werden kann. Als Exportformat wird das *Shapefile*-Format unterstützt, das als Attribute die Fläche in Hektar der einzelnen Polygone enthält.

Der gesamte Prozessbaum der Brandflächendetektion sowohl für optische monotemporale als auch für multitemporale Daten mit der jeweiligen Umsetzung im *eCognition Architect* befindet sich im Anhang.

5.1.9 Übertragbarkeitstest

Um sicherzugehen, dass die entwickelte Methode die Grundvoraussetzung der Übertragbarkeit erfüllt, wird sowohl die monotemporale als auch die multitemporale Methode an verschiedenen Gebieten getestet.

Monotemporal

Die an der Satellitenbildszene des 25.08.2009 der Region Grammatiko nördlich von Athen entwickelte Methode zur Brandflächendetektion wird auf die Waldbrände vom 01.09.2007 in Griechenland nördlich von Athen und die Waldbrände vom 28.07.2009 in Sardinien übertragen. Für beide Gebiete ist nur eine geringfügige Anpassung der Schwellwerte nötig, um ein gutes Klassifikationsergebnis zu erzielen. Nähere Ausführungen zur Genauigkeitsanalyse mit einem Flächenvergleich zu ZKI-Referenzflächen für dieses Verfahren sind unter Punkt 6.2 zu finden.

Multitemporal

Der entwickelte multitemporale Algorithmus wird ebenfalls auf seine Übertragbarkeit getestet. Als Referenzdaten dienen auch hier wiederum die Waldbrände vom 28.07.2009 auf Sardinien und vom 01.09.2007 in Griechenland. Für beide Gebiete liegt ein SPOT 5 Satellitenbildpaar vor. Die SPOT 5 Satellitenbildszenen von Griechenland stehen in geometrisch und radiometrisch korrigierter Form zur Verfügung, für die SPOT 5 Satellitenbildszenen von Sardinien sind diese idealen Voraussetzungen jedoch nicht gegeben. Dies wirkt sich bei einer Veränderungsanalyse gravierend aus. Aufgrund der Lageungenauigkeiten werden viele Straßen und städtische Bereiche fälschlicherweise als Brandfläche detektiert. Die fehlende Atmosphärenkorrektur führt zu Fehlklassifikationen im Küstenbereich und bei Wolkenschatten. Hier zeigt sich deutlich, dass für eine Veränderungsanalyse sowohl eine geometrische als auch radiometrische Korrektur wichtige Grundvoraussetzungen darstellen. Da das Klassifikationsergebnis der Waldbrände in Sardinien bereits visuell ein schlechtes Ergebnis zeigt, wird auf einen späteren

Flächenvergleich mit ZKI-Referenzflächen verzichtet. Das SPOT 5 Satellitenbildpaar der Waldbrände von Griechenland 2007 verfügt über diese Voraussetzungen. Hier war nur eine geringfügige Anpassung der Schwellwerte für eine gute Erfassung der Brandfläche nötig. Die genaue Auflistung der verbrannten Flächen findet sich auch hier wiederum unter Punkt 6.2.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl das monotemporale als auch das multitemporale Verfahren zur Brandflächendetektion gut übertragbar auf andere Gebiete im mediterranen Raum sind. Die Vorprozessierungsschritte der geometrischen und radiometrischen Korrektur sind für eine Veränderungsanalyse zwingend nötig, und verbessern auch im monotemporalen Verfahren das Ergebnis.

5.2 Entwicklung eines objekt-basierten Brandflächendetektionsmodells für TerraSAR-X

Wie bereits erwähnt liegt der große Vorteil der Mikrowellenstrahlen darin, dass sie sowohl bei Tag und Nacht operieren, als auch Wolken durchdringen können. Die SPOT 5 Satellitenbildszene vom 25.08.2009 in Griechenland weist dichte Wolken im Westen des Bildes auf, auch im Bereich der Brandfläche. Nicht nur die Wolke selbst, auch ihr Schatten verhindern in diesen Bereichen das Erkennen der Brandfläche in optischen Satellitenbilddaten.

Wie bereits unter Punkt 3.2.2 gezeigt wurde gibt es nur wenige Studien zur Brandflächendetektion mit Mikrowellen, wobei sich die meisten Autoren mit Waldbränden im tropischen Regenwald oder im borealen Nadelwald befassen. Nur Gimeno et al. 2004 [a und b] und Tanase et al. 2010 haben bis jetzt Studien zur Brandflächendetektion im mediterranen Raum durchgeführt. Gimeno et al. 2004 stützte sich dabei auf Radarsat-1 [a] und ERS2-Daten [b]. Tanase et al. führte eine Studie dazu durch, ob die Stärke des Verbrennungsgrades mit Hilfe von Mikrowellen erfasst werden kann und verwendete dabei den Satelliten TerraSAR-X. Ziel dieser Diplomarbeit ist es herauszufinden, ob eine Erfassung der Brandfläche mit Hilfe von monotemporalen oder multitemporalen TerraSAR-X Daten möglich ist, und wenn ja, wie genau. So ist redundant zu den optischen Daten eine Fragestellung dieser Arbeit, ob nicht verbrannte Gebiete innerhalb der Brandfläche erkannt werden können. Ebenfalls ist von Interesse, ob die Brandflächendetektion von der vorher vorherrschenden Vegetation abhängig ist. Da TerraSAR-X sowohl in HH als auch in VV Polarisation Mikrowellen aussenden und empfangen kann, ist es wichtig festzustellen welche Polarisation sich zum Erkennen einer Brandfläche besser eignet. Ebenfalls soll eine Synergie zwischen den passiven und aktiven Systemen zur Brandflächendetektion geschaffen werden, damit die Vorteile beider Verfahren ausgeschöpft werden können und sich gegebenenfalls gegenseitig ergänzen.

5.2.1 Rückstreuverhalten

Um das Rückstreuverhalten der verbrannten Bereiche mit den nicht verbrannten vergleichen zu können, werden redundant zum optischen Verfahren *Plots* von 20x20 Meter Größe über die gesamte Satellitenbildszene vom 31.08.2009 in Griechenland verteilt. Dabei werden die bereits im optischen Verfahren gewählten Klassen übernommen, da es in den Radar-Aufnahmen nicht möglich ist diese Klassen zu erkennen. Es wird darauf geachtet, dass sowohl dem Sensor zugeneigte als auch abgeneigte Hänge erfasst werden. Dieser Rückstreuvvergleich wird durchgeführt um zu überprüfen, ob sich die Brandfläche auch im post-Bild signifikant von den anderen Landnutzungsklassen unterscheidet und somit erfasst werden kann. Abbildung 5-9 zeigt das Rückstreuverhalten der verschiedenen Klassen der TerraSAR-X *Stripmap*-Satellitenbildszene. Aus dieser Abbildung ist klar ersichtlich, dass es nicht möglich ist anhand der Rückstreuung einer post Satellitenbildaufnahme die Brandfläche zu erfassen, da sie sich nicht signifikant von den anderen Klassen unterscheidet. Ein ähnliches Rückstreuergebnis liefern ebenfalls die übrigen TerraSAR-X Satellitenbildszenen, sowohl von Griechenland als auch von La Palma. Dabei ergibt sich kein Unterschied, ob es sich um in *Stripmap*, *Spotlight*, VV oder HH aufgezeichnete Daten handelt.

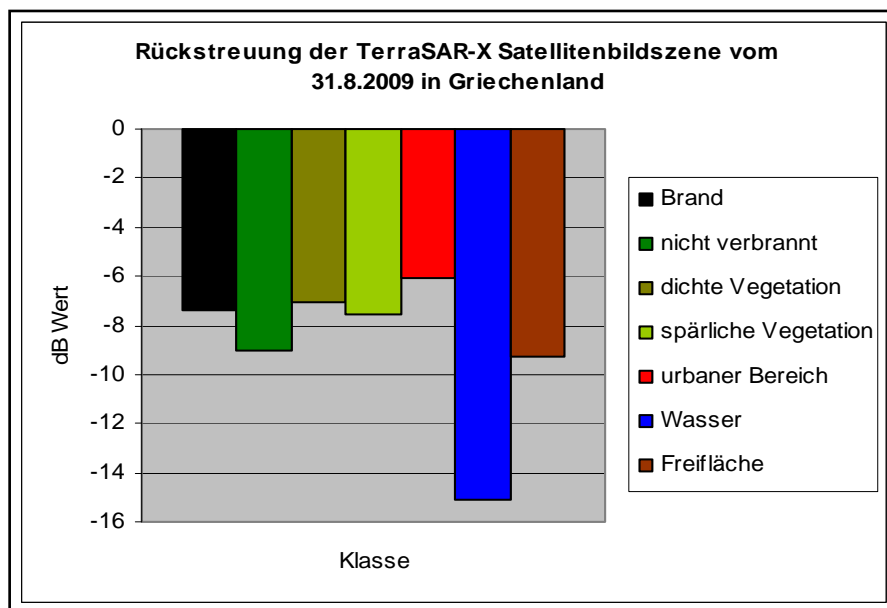


Abbildung 5-9: Rückstreuung der TerraSAR-X Satellitenbildszene in Griechenland, eigene Darstellung

Als nächste Frage gilt es zu klären, welche Polarisation sich zur Brandflächendetektion am Besten eignet. Um dies feststellen zu können wird die Rückstreuung der Satellitenbildszenen sowohl in HH- als auch in VV Polarisation ermittelt. Da in La Palma keine pre Aufnahmen in unterschiedlichen Polarisationen zur Verfügung stehen, wird diese Fragestellung anhand der Griechenland Satellitenbildszenen entschieden. Abbildung 5-10 zeigt die Rückstreuung aus dem Bereich der Brandfläche sowohl von der HH als auch von der VV Polarisation, mit den jeweiligen korrespondierenden Flächen im pre-Bild. Daraus ist ersichtlich, dass die

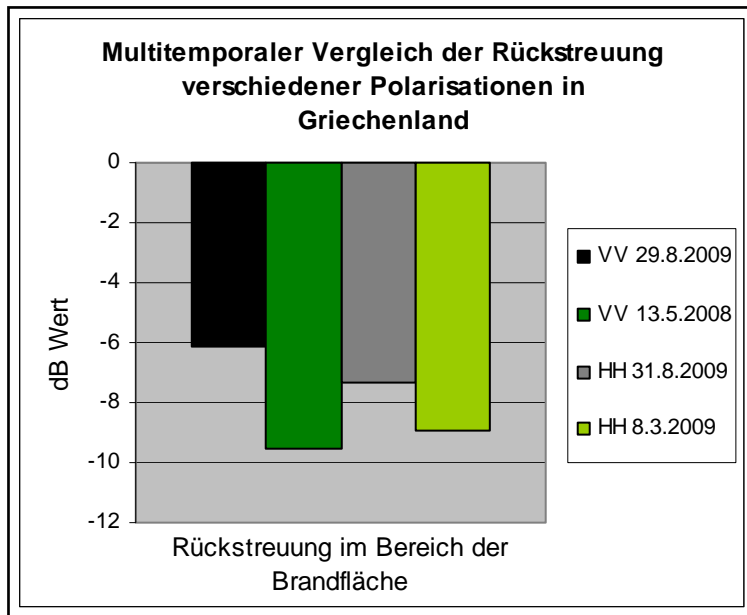


Abbildung 5-10: Rückstreuung verschiedener Polarisationen in Griechenland, eigene Darstellung

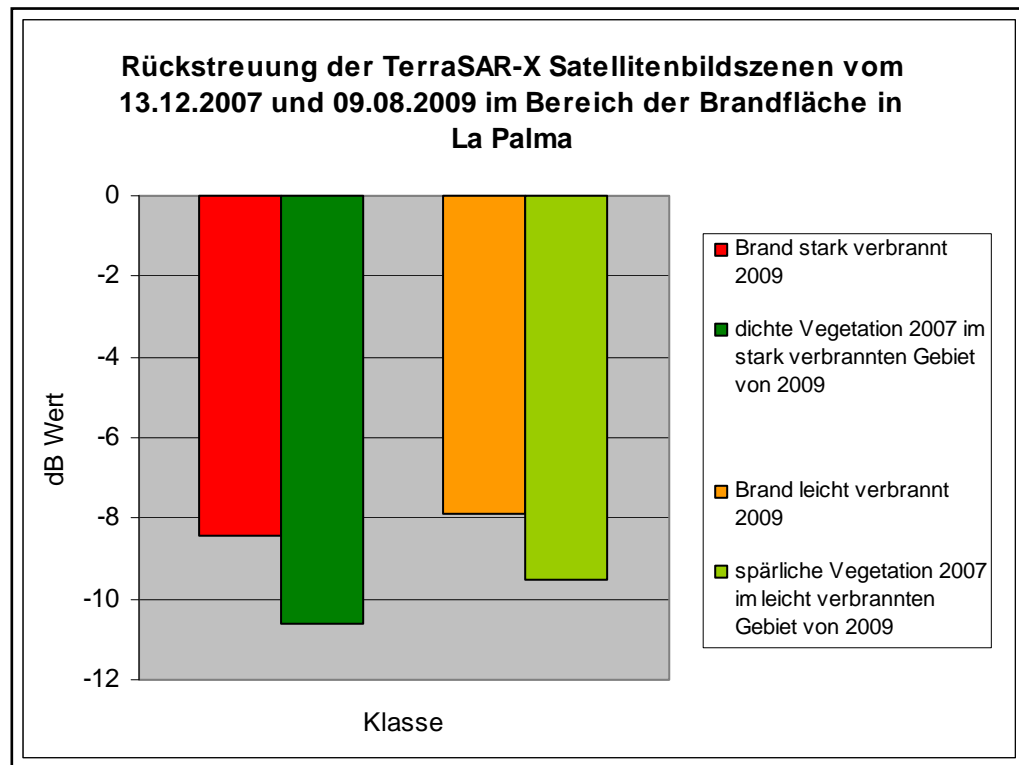
Brandfläche in VV Polarisation besser zu erkennen ist als in HH Polarisation. Sowohl der Rückstreuwert der VV Polarisation, als auch die Differenz zwischen pre und post Bild ist höher. Wie bereits unter Punkt 3.2.1 erwähnt, reagiert jeder Streuer unterschiedlich auf die auftreffende Polarisation. Weist er die gleiche Richtungskomponente wie der Streuer auf, so ist die Intensität des Radarechos besonders hoch. Dies ergibt für die VV Polarisation, dass vor allem vertikal ausgerichtete Objekte

sensibel reagieren, während horizontal ausgerichtete Objekte stärker bei HH Polarisation zurückstreuen (Tanase et al. 2010). Die von TerraSAR-X ausgesandten X-Band Mikrowellen streuen vor allem an Blättern, Nadeln und kleinen Ästen, und weisen nur eine geringe Eindringtiefe in die Waldvegetation auf (Tanase et al. 2010). Brennen Blätter, Nadeln, kleine Äste und auch die bodenbedeckende Vegetation ab, reduziert dies das X-Band Signal. Aufgrund dessen, sowie der vermehrten Interaktion zwischen Stämmen und Boden (*double bounce*), nimmt die Rückstreuung zum Sensor über Brandflächen zu (Tanase et al. 2010). Da die VV Polarisation auf vertikale Objekte sensibler reagiert als die HH Polarisation erklärt dies die stärkere Rückstreuungen der VV Polarisation gegenüber der HH Polarisation über Brandflächen.

Als nächstes wird die Rückstreuung der Brandfläche auf dem Sensor zugewandten und dem Sensor abgewandten Bereichen verglichen. Dabei konnten Tanase et al. 2010 und Gimeno et al. 2004 [a] feststellen, dass die Rückstreuung auf Sensor zugeneigten Hängen im Vergleich zu Sensor abgeneigten Hängen stärker ist. Dieses Ergebnis kann ebenfalls in den TerraSAR-X Satellitenbildszenen von Griechenland und La Palma festgestellt werden.

Mit Hilfe der optischen Satellitendaten konnte eine Unterscheidung der Brandfläche in La Palma nach „leicht verbrannt“ und „stark verbrannt“ vorgenommen werden. Diesbezüglich gilt es zu überprüfen, ob auch in den Radar-Daten ein Unterschied des Rückstreuverhaltens in diesen Bereichen festgestellt werden kann. Abbildung 5-11 zeigt die Rückstreuung der TerraSAR-X Satellitenbildszenen vom 13.12.2007 und 09.08.2009 von La Palma im Vergleich. Um die Rückstreuung der pre und post Satellitenbildszenen vergleichen zu können werden für beide Satellitenbilder in den mit Hilfe der SPOT 5 Daten ermittelten stark verbrannten und leicht verbrannten Gebieten redundante Plots ausgewählt. Dabei ergibt sich,

dass die Rückstreudifferenz der jeweiligen Satellitenbildpaare in den stark verbrannten Gebieten höher als in den leicht verbrannten Gebieten ist. Dies lässt den Schluss zu, dass die Brandflächendetektion mit TerraSAR-X umso besser funktioniert je mehr Vegetation vorhanden ist. Spärliche Vegetation als Ausgangsvegetation wirkt hingegen als limitierender Faktor zur Brandflächendetektion.



**Abbildung 5-11: Rückstreuung der TerraSAR-X Satellitenbildszenen in La Palma,
eigene Darstellung**

Zusammenfassend zu diesem Punkt lässt sich sagen, dass die Rückstreuung über der Brandfläche auf dem Sensor zugewandten Hängen stärker ausgeprägt ist als auf Sensor abgewandten Hängen. Die Brandfläche kann in VV Polarisation besser erkannt werden als in HH Polarisation, wobei die Ausgangsvegetation entscheidend ist um die Brandfläche überhaupt erfassen zu können. Es ist nicht möglich die Brandfläche anhand von einer post-Satellitenbildszene zu detektieren, egal in welchem Modus die Daten aufgenommen wurden.

5.2.2 Algorithmus

Im Gegensatz zu einem optischen Satellitenbild ist es bei Radarbildern nicht möglich, die Brandfläche in einer monotemporalen Aufnahme visuell zu erkennen. Dies ist auch mit Hilfe der verschiedenen Polarisationen (VV und HH) der *Spotlight* Satellitenbildszenen vom 09.08.2009 in La Palma nicht möglich. Ohne die Hilfe eines optischen Satellitenbildes, Referenzflächen vor Ort, oder Vorwissen des Auswerter würde sich eine Erfassung der Brandfläche als schwierig und unsicher erweisen. Zur Visualisierung der Brandfläche wird

daher

ein

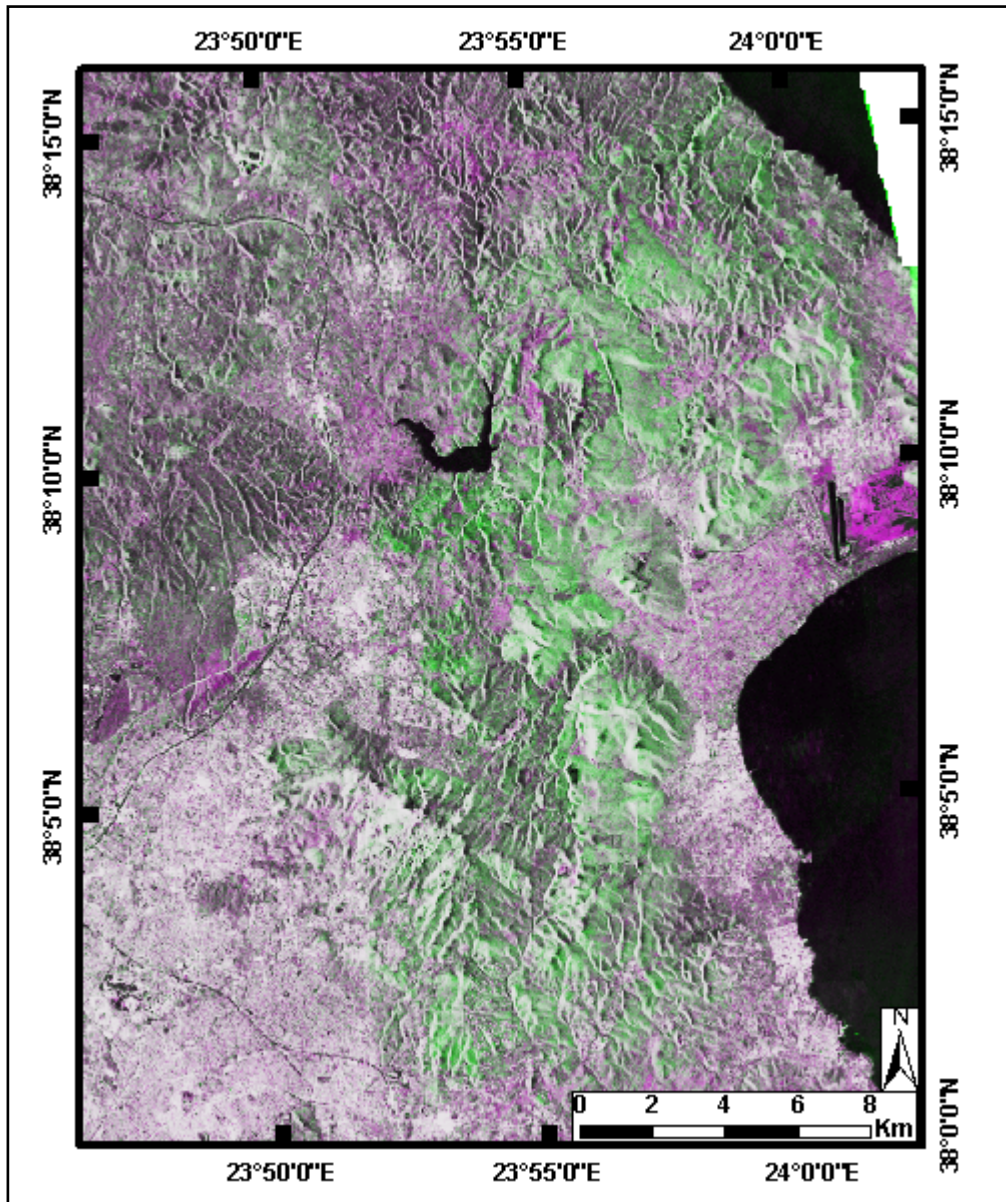


Abbildung 5-12: Visualisierung der Brandfläche in Griechenland mit TerraSAR-X, eigene Darstellung

Satellitenbildpaar (pre und post) benötigt. Abbildung 5-12 zeigt eine Überlagerung der Satellitenbildszenen vom 8.3.2009 und vom 31.8.2009. In der *Software ArcGis* wurde aus diesen beiden Szenen ein Falschfarbenbild in der Bandkombination rot = 8.3.2009, grün = 31.08.2009 und blau = 8.3.2009 erstellt. Die Brandfläche hebt sich in grün gegen den lilafarbenen Rest des Satellitenbildes ab. Die Waldbrände in La Palma wurden in zwei verschiedenen Aufnahmemodi, im *Spotlight* und im *Stripmap*-Modus, aufgezeichnet. Die *Spotlight*-Szene wurde jedoch während des Brandes aufgezeichnet. Das Fehlen einer *Spotlight*-Satellitenbildszene vor den Bränden erschwert eine Visualisierung der Brandfläche. Ebenfalls ist es nicht möglich, die Brandfläche anhand dieser Satellitenbildszene zu detektieren. Das Rückstreuungssignal der Brandfläche unterscheidet sich nicht signifikant von der Rückstreuung des restlichen Satellitenbildes (siehe Punkt 5.2.2).

Abbildung 5-13 verdeutlicht den im Zuge der *Radar*-Methode zur Brandflächendetektion entwickelten Algorithmus. Auch hier stellt die unter Punkt 4.2 beschriebene Vorverarbeitung der Daten einen ersten Schritt zur erfolgreichen Erfassung der Brandfläche für den gewählten Algorithmus dar. Wobei wiederum gilt, dass im operationellen Dienst aufgrund von Zeitmangel diese Vorverarbeitung nicht immer eingehalten werden kann. Sie gilt jedoch als erstrebenswert, um ein bestmögliches Klassifikationsergebnis erzielen zu können. So erbringt der Versuch EEC-Daten zu klassifizieren ein schlechteres Ergebnis als die selbst vorprozessierten Daten.

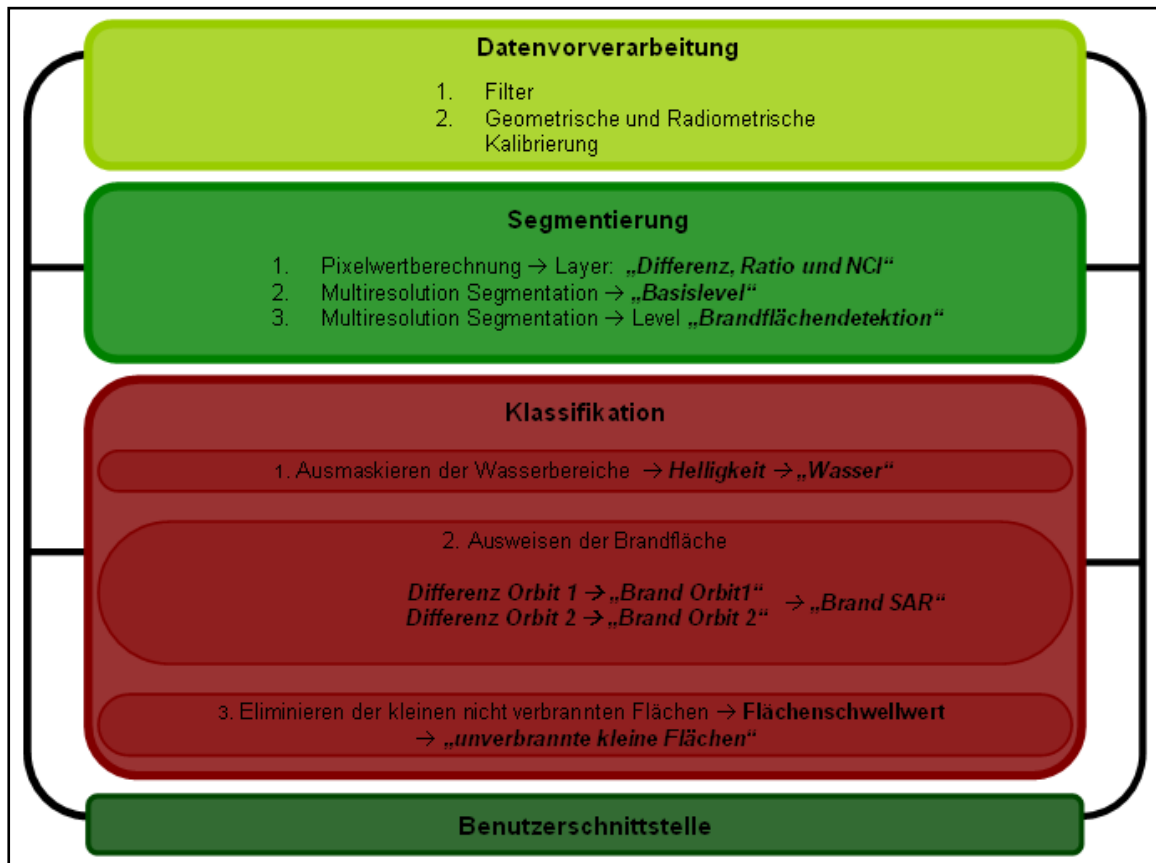


Abbildung 5-13: Schema des Radar-Algorithmus zur Brandflächendetektion, eigene Darstellung

Die Segmentierung stellt den zweiten Schritt des Algorithmus dar. Als Grundvoraussetzung für ein gutes Klassifikationsergebnis ist es auch bei Radar-Daten wichtig einen geeigneten Segmentierungsalgorithmus und Segmentierungsmaßstab zu wählen (näheres siehe Punkt 5.2.3).

Der dritte Schritt beinhaltet die Klassifikation. Das Verfahren zur Brandflächendetektion für TerraSAR-X wird anhand der Satellitenbildszenen von Griechenland entwickelt und anschließend auf den Waldbrand von La Palma übertragen. Für die Radarauswertung der Brandflächendetektion wird im Zuge dieser Arbeit eine Veränderungsanalyse durchgeführt. Dabei wird das *Image Differencing* Verfahren verwendet. Dieses unkomplizierte, aber zielführende Verfahren subtrahiert Objekt für Objekt das pre-Bildes vom post-Bild. Dieses

Verfahren wurde bereits häufig zur Veränderungserkennung bei Landbedeckungen verwendet, weißt jedoch den Nachteil auf, dass ein passender Schwellwert, der auf Expertenwissen beruht, gefunden werden muss (Lu et al. 2004). Im Zuge der Klassifikation werden zuerst die Wasserbereiche ausmaskiert, um eine Fehlklassifikation dieser Bereiche zu vermeiden. Anschließend wird auf Grundlage der Differenz zwischen post- und pre Bild die Brandfläche ausgewiesen. Je nach vorhandener Datengrundlage kann man dabei auf einen oder zwei verschiedene Flugrichtungen zurückgreifen. Als letzten Punkt der Klassifikation werden kleine, nicht verbrannte Flächen eliminiert. Die genaue Beschreibung der Klassifikation der Brandfläche erfolgt unter Punkt 5.2.4.

Als letzter Schritt wird zur einfacheren und schnelleren Anwendung des Algorithmus eine Benutzerschnittstelle erzeugt. Das Generieren der Benutzerschnittstelle folgt dem gleichen Schema wie im optischen Brandflächendetektionsverfahren und wird deswegen unter Punkt 5.2.5 nur kurz näher erklärt. Hier sei der Leser auch auf die optische Benutzerschnittstelle unter Punkt 5.1.8 verwiesen.

Im Folgenden wird die Wahl der Segmentierung und die Umsetzung der Klassifikation der Brandfläche näher beschrieben.

5.2.3 Segmentierung

Wie bereits im optischen Verfahren gezeigt wurde, ist die gewählte Segmentierung ausschlaggebend für ein gutes Klassifikationsergebnis. Ein Radar-Bild enthält jedoch andere Informationen als ein optisches Bild, was die Wahl neuer Segmentierungsparameter erfordert. Im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums besteht die Bildinformation aus Reflexion und Emissivität der Erdoberfläche, wohingegen die Radar Rückstreuung hauptsächlich von der Struktur und der dielektrischen Eigenschaft der beobachteten Fläche abhängt (Riedel et al. 2008). Da eine Erkennung der Brandfläche mit Hilfe der Mikrowellenstrahlung ohne multitemporale Verfahren nicht möglich ist, muss dieses Verfahren bereits in die Segmentierung mit einfließen, um die Brandfläche erfassen zu können. Bevor die Segmentierung durchgeführt wird erfolgt eine pixelbasierte Berechnung. Hierfür wird in der *Software eCognition Developer* das Differenzbild, das Ratiobild und der *Normalized change index (NCI)* aus den pre und post Satellitenbildszenen berechnet. Der NCI bildet sich wie folgt:

$$NCI = \frac{Post - Pre}{Post + Pre} \quad 5.3$$

Alle drei Verfahren geben den Grad der Veränderung zwischen pre und post-Bild wieder. Der Informationsgehalt ist in allen drei berechneten *Layer* relativ ähnlich. Jedoch ist das

Segmentierungsergebnis besser, wenn sowohl *Differenz*, *Ratio* und *NCI* berücksichtigt werden, als wenn eines dieser Verfahren keine Verwendung findet. Abbildung 5-14 zeigt das Differenzbild der nördlichen Brandfläche in Griechenland aus den Satellitenbildszenen vom 13.05.2008 und 29.08.2009. Die Brandfläche in der Mitte des Bildes hebt sich deutlich heller gegen den Rest ab.

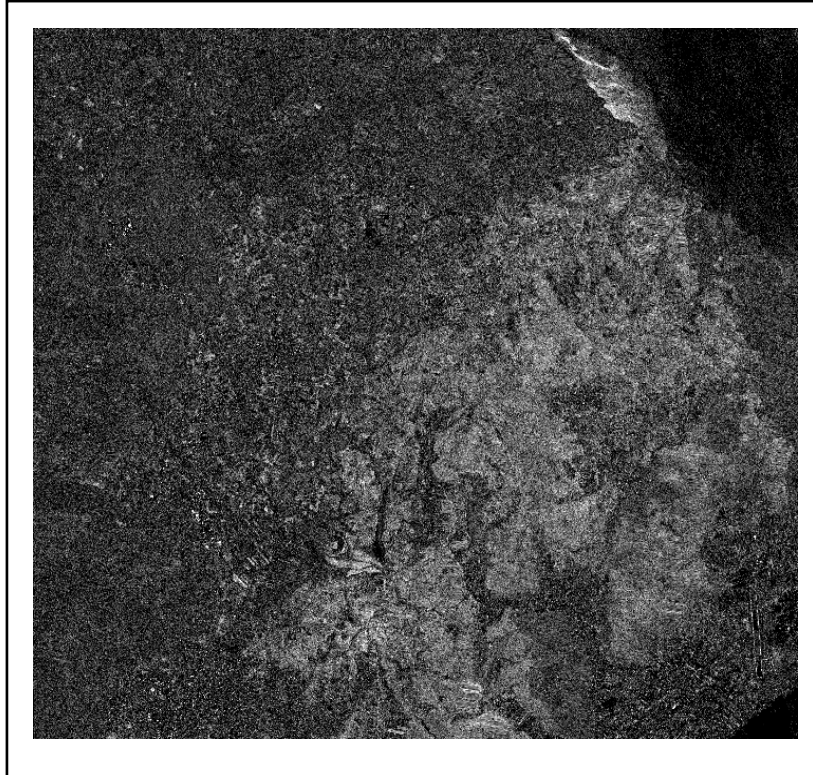


Abbildung 5-14: Differenzbild der TerraSAR-X Satellitenbildszenen vom 13.5.2008 und 29.08.2009 in Griechenland, eigene Darstellung

Nach einem iterativen Test verschiedener Segmentierungsalgorithmen in der *Software eCognition Developer* wird dem Beispiel von Thiel et al. 2008 und Esch 2006 gefolgt und eine *Multiresolution Segmentation* verwendet. Ein Vorteil der objektbasierten Klassifikationsmethode zu den bereits unter Punkt 5.1.6 erwähnten liegt bei den Radar-Daten speziell darin, dass durch die Generalisierung der Objekte das *speckle*-Problem weiter minimiert wird (Thiel et al. 2008). Die Wahl der Segmentierungsparameter erfolgt iterativ. Der *Scaleparameter* für die Formkriterien wird im Vergleich zu den optischen Daten erhöht, da sich dies als hilfreich erweist um inhomogene Objekte zu vermeiden (Definiens AG 2010). Die *Layer*-Gewichtung wird auf den *Differenz*-, *Ratio*-, *NCI*-, und *Post-Layer* festgelegt. Die Bildinformation des *Post-Layers* ist wichtig um die Wasserflächen genau abgrenzen zu können, was durch multitemporale Verfahren nur ungenau möglich ist. Um homogene, große Objekte, die jedoch so genau wie möglich die Brandfläche erfassen zu erhalten, wird ein Segmentierungsverfahren bestehend aus zwei Level gewählt. Zuerst wird das *Basislevel* mit kleinen Objekten generiert. Aufbauend auf diesem Level wird mit Hilfe

einer *Multiresolution Segmentation* das Level *Brandflächendetektion* mit größeren Objekten erzeugt. Es stellt sich heraus, dass homogenere Objekte entstehen, wenn die Radar-Daten trotz hohem Speicherbedarf als 32-bit *float* Daten verwendet werden.

Im Folgenden wird die Klassifikation der Brandfläche näher erläutert.

5.2.4 Klassifikation

Wasserflächen können in einem Radar-Bild je nach Wellengang eine hohe oder geringe Rückstreuung aufweisen. Ist das Wasser zum Beispiel im pre-Bild sehr ruhig, und herrscht im post-Bild starker Wellengang, wird bei multitemporalen Verfahren eine ähnlich hohe Veränderung angezeigt wie im Bereich der Brandfläche. Um hier eine Fehlklassifikation zu verhindern wird die Wasserfläche in einem ersten Schritt ausmaskiert. Dies wird mit Hilfe der Helligkeitswerte des post-Bild umgesetzt, da Wasserbereiche in Radar-Daten die niedrigsten Bildwerte aufweisen (vergleiche Punkt 3.2.1). Als nächster Schritt wird die Brandfläche klassifiziert. Wie bereits erwähnt erhalten *Differenz*-, *Ratio*-, und *NCI-Layer* ähnliche Informationen, weswegen es zur Klassifikation der Brandfläche ausreicht eines dieser drei Verfahren zu verwenden. Die Wahl fällt dabei auf den *Differenz-Layer*, da sich das Klassifikationsergebnis der Brandfläche in Griechenland als geringfügig besser gegenüber den beiden anderen Verfahren erweist. Das Differenzbild gibt den Grad der Veränderung zwischen pre und post-Bild wieder. Je höher der Wert der Objekte, umso stärker ist die Veränderung. Um die Brandfläche klassifizieren zu können, wird ein Schwellwert festgelegt, den die Objekte übersteigen müssen. In Zuge dieser Arbeit wurde bereits ermittelt, dass die Rückstreuung der VV Polarisation über Brandflächen am höchsten ist, und dass die Rückstreuung von dem Sensor zugewandten Gebieten höher ist als von dem Sensor abgewandten Gebieten. In der Nordhälfte des Waldbrandes von Griechenland (siehe Punkt 2.3.1) liegen als Datengrundlage Satellitenbildpaare sowohl in unterschiedlicher Polarisation (HH und VV) als auch in unterschiedlichem Orbit (*ascending* und *descending*) zur Verfügung. Im Südteil der Brandfläche ist jedoch nur ein Orbit in HH Polarisation als Datengrundlage vorhanden. Bei der Klassifikation stellt sich heraus, dass die Brandfläche im Norden deutlich besser erfasst werden kann als im Süden. Dies liegt vor allem an den verschiedenen Flugrichtungen der Satellitenbildszenen, da so die gebirgige Landschaft besser erfasst werden kann. Steht nur ein Orbit zur Verfügung, liegt eine Hangseite immer im Radarschatten, was ein Erkennen der Brandfläche stark mindert. Des Weiteren bestätigt sich die bessere Erfassung der Brandflächen in VV-Polarisation gegenüber der HH-Polarisation. Abbildung 5-15 verdeutlicht dies am Beispiel des nördlichen Waldbrandgebietes. Im linken Bild der Graphik ist das Klassifikationsergebnis der VV Polarisation abgebildet, im rechten Bild das der HH Polarisation. Die beiden unteren Bilder der Graphik zeigen das SPOT 5 Satellitenbild, das mit den Umrisslinien des Radar-Klassifikationsergebnisses überlagert ist. Das linke zeigt die nördliche Brandfläche mit den Umrisslinien der VV Klassifikation, das rechte Bild die südliche Brandfläche mit denen der HH Polarisation. In Abbildung 5-15 ist deutlich zu erkennen, dass die Brandfläche mit Hilfe der VV Polarisation besser detektiert

werden kann als mit HH. Dies ist nicht nur im Nordteil der Brandfläche ersichtlich, sondern lässt sich auch an den nicht immer passenden Umrisslinien im Süden der Brandfläche erkennen.

Als Datengrundlage können auch zwei verschiedene Flugrichtungen mit gleichen Polarisationen vorliegen können. Um Verwechslungen vorzubeugen, wird daher nicht die Polarisation, sondern der Orbit als Klassenname verwendet („*Brand Orbit 1*“ und „*Brand Orbit 2*“). Wie Abbildung 5-15 zeigt gibt es einige kleine Objekte außerhalb der Brandfläche, die fälschlicherweise als Brandfläche ausgewiesen werden. Um diese Objekte zu eliminieren, werden die Klassen „*Brand Orbit 1*“ und „*Brand Orbit 2*“ zur Klasse „*Brand SAR*“

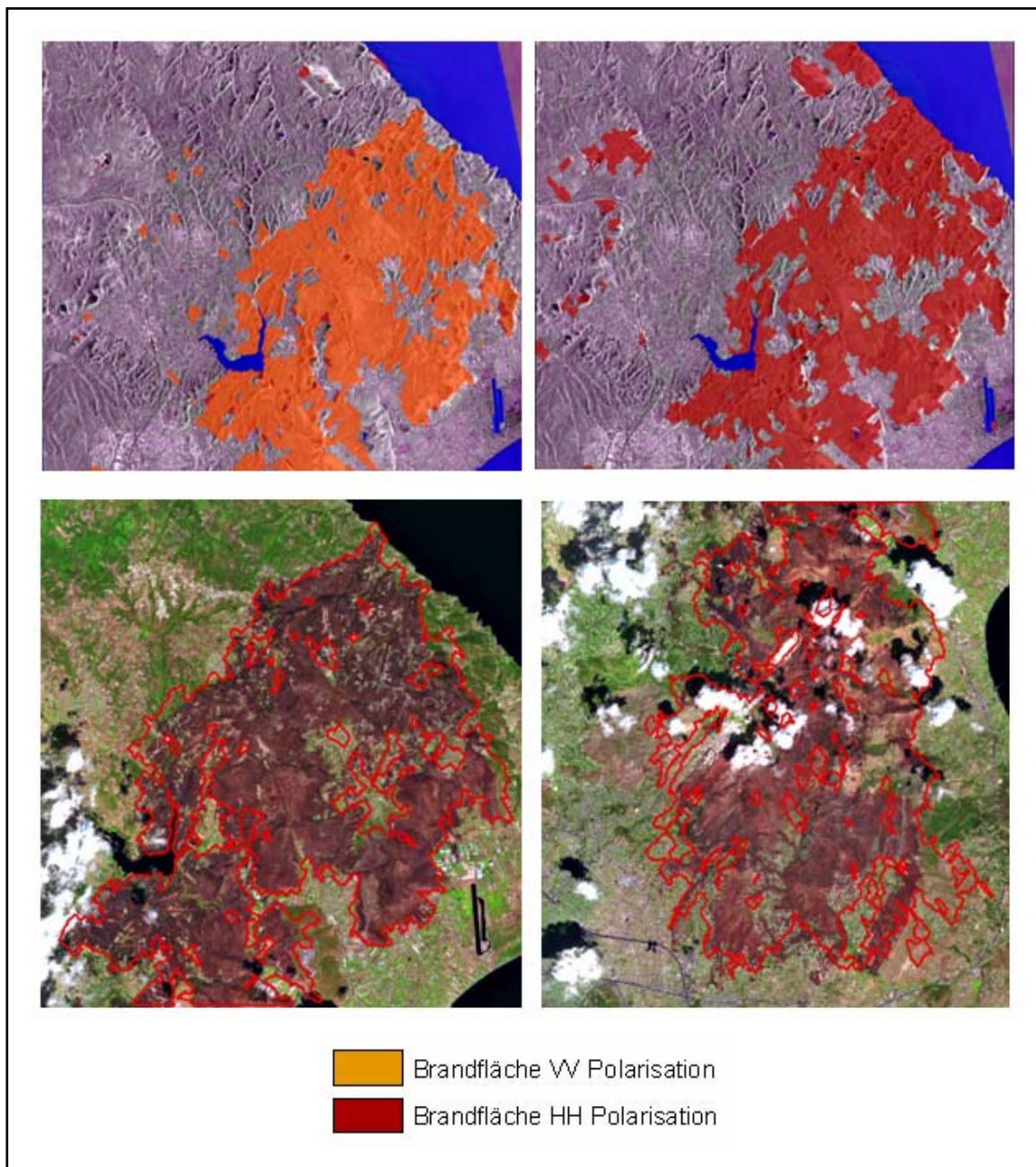


Abbildung 5-15: Brandfläche der Radar-Klassifikation im Vergleich, eigene Darstellung

zusammengefasst und wiederum aggregiert. Anschließend wird ein Flächenschwellwert festgelegt, den die Objekte übersteigen müssen um weiterhin der Klasse „Brand SAR“ angehören zu können. Liegen sie unter diesem Schwellwert, werden sie der Klasse „unverbrannte kleine Flächen“ zugeordnet. Abbildung 5-15 zeigt, dass kleine, unverbrannte Objekte innerhalb der Brandfläche mit TerraSAR-X Stripmap Satellitenbildszenen nicht erkannt werden. Auch die Wahl eines sehr kleinen Segmentierungsmaßstabes bringt hier keinen Vorteil, da die Klassifikation als verbrannt oder nicht verbrannt für kleine nicht verbrannte Objekte innerhalb der Brandfläche eher willkürlich erfolgt. Aufgrund unzureichender Klassifikationsgenauigkeit, vor allem Fehlklassifikationen kleiner Bereiche in der Nähe der Brandflächen, wird ein etwas größerer Segmentierungsmaßstab beibehalten.

Zusammenfassend kann zur Brandflächendetektion mit Terrasar-X Daten festgestellt werden, dass es von der vor dem Brand bestehenden Vegetation abhängt, ob ein Erkennen der Brandfläche möglich ist oder nicht. Generell erbringt nur ein multitemporales Verfahren gute Ergebnisse, mit monotemporalen Daten war es nicht möglich die Brandfläche zu detektieren. Das Radar-Verfahren zur Brandflächendetektion erweist sich als nicht so genau wie das optische Verfahren. So ist es nicht möglich, kleine unverbrannte Bereiche innerhalb der Brandfläche, oder kleine verbrannte Bereiche außerhalb der Hauptbrandfläche zu erfassen. Es gelang jedoch gut die Umrisse des Waldbrandes zu erkennen, wobei sich hier das Klassifikationsergebnis als besser erwies wenn die multitemporalen Daten in verschiedenen Flugrichtungen und in VV Polarisation aufgenommen werden.

5.2.5 Benutzerschnittstelle

Zur leichten Bedienung des Algorithmus wird auch zur Brandflächendetektion mit TerraSAR-X Daten eine Benutzerschnittstelle kreiert. Diese Benutzerschnittstelle funktioniert ähnlich wie bereits unter Punkt 5.1.8 für den optischen Algorithmus erklärt. Der Segmentierungsmaßstab und damit die Objektgröße kann vom Nutzer selbst eingegeben werden. Ebenfalls kann der Schwellwert sowohl für „Brand Orbit 1“ als auch für „Brand Orbit 2“ mit Hilfe eines Reglers definiert werden. Steht nur ein Orbit zur Verfügung, bleibt der Schwellwert für „Brand Orbit 2“ undefiniert. Der Schwellwert der Flächengröße ist selbst definierbar. Weiterhin kann ein beliebiger Speicherplatz für die fertig klassifizierte Brandfläche gewählt werden. Alle anderen Prozesse laufen im Hintergrund des Programms ab. Möchte der Nutzer einige Objekte zusätzlich als „Brand SAR“ ausweisen, oder einige als „Brand SAR“ klassifizierte Objekte als unklassifiziert definieren, kann dies mit der Funktion *manuelles Editieren* durchgeführt werden. Die Benutzerschnittstelle und der dazugehörige Prozessbaum befinden sich im Anhang.

5.2.6 Übertragbarkeitstest

Der am Waldbrand in Griechenland entwickelte Algorithmus wird zur Prüfung der Übertragbarkeit auf den Waldbrand im August 2009 in La Palma übertragen. Hier steht als Datengrundlage ein TerraSAR-X *Stripmap* Satellitenbildpaar in HH Polarisation zur Verfügung. Das in Griechenland entwickelte Verfahren erweist sich für La Palma als äußerst passend. Die gefundenen Schwellwerte müssen nur geringfügig angepasst werden. Es stellt sich jedoch heraus, dass nicht die ganze Brandfläche La Palmas mit Hilfe von TerraSAR-X

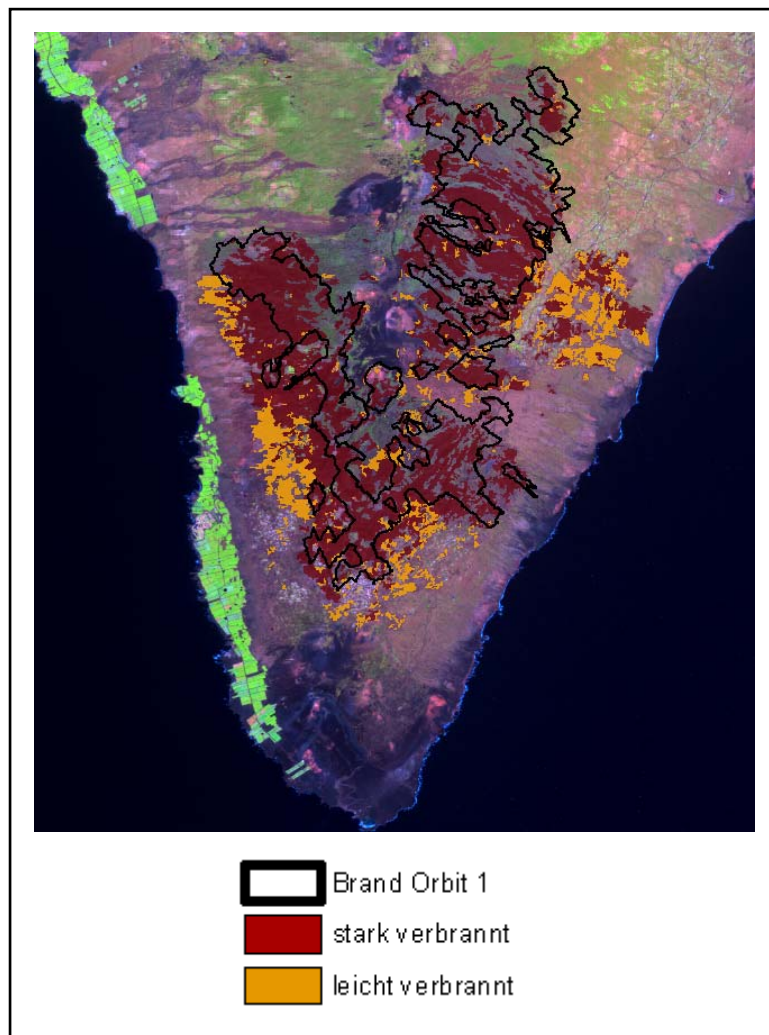


Abbildung 5-16: Überlagerte Radar-Brandfläche in La Palma
(Bandkombination SWIR, NIR, grün), eigene Darstellung

Daten erfasst werden kann. Die im optischen Satellitenbild als „leicht verbrannt“ ausgewiesenen Gebiete können weder durch *Ratio*-, *Differenz*-, noch *NCI*-Berechnung erkannt werden. Die „stark verbrannten“ Gebiete können hingegen gut mit der Radar-Methode erfasst werden. Abbildung 5-16 stellt dies graphisch dar. Somit wird die bereits bei der Rückstreuung getroffene Vermutung bestätigt, dass eine gewisse Masse an bestehender Vegetation vorhanden sein muss, um mittels TerraSAR-X Daten eine Brandflächendetektion durchführen zu können. Die Nadelwaldvegetation in den „stark verbrannten“ Gebieten reicht mit ihren dickeren Stämmen, und hohen Vegetationsbedeckung aus, um das Radar-Rückstreusignal so

stark zu verändern, dass Brand und nicht Brand unterschieden werden können. Die spärliche Heidekrautvegetation in den „leicht verbrannten“ Gebieten hingegen beinhaltet nach einem Brand zu wenig Veränderung um detektiert zu werden. Die vorhandene Vegetation wirkt daher zur Brandflächendetektion mit TerraSAR-X Daten als limitierender Faktor. Menges et al. 2004 konnte bei einem Brand in Australien ähnliches feststellen. Hierbei wurde mit *airborne* C-Band Daten ein Waldbrand aufgenommen. Über Flächen, die vorher aus Grasvegetation bestanden haben, konnte keine Veränderung im Rückstreusignal festgestellt

werden. Handelte es sich hingegen um Holzvegetation, konnte die Brandfläche gut detektiert werden.

5.3 Synergie von aktiven und passiven Systemen zur Brandflächendetektion

Die beiden unter Punkt 5.1 und 5.2 beschriebenen Verfahren haben gezeigt, dass es sowohl mit optischen als auch mit Radar-Satelliten möglich ist, Waldbrände im mediterranen Raum zu detektieren. Im Zuge dieser Arbeit wird versucht die Vorteile von beiden Verfahren in einer Kombination aus aktiven und passiven Systemen zu nutzen. Dies stellt nach Arino et al. 2001 die effektivste Methode zur Brandflächendetektion dar. Mit Hilfe des optischen Verfahrens können auch kleine, nicht verbrannte Gebiete innerhalb der Brandfläche, oder kleine Bereiche neben der Brandfläche als Brand erfasst werden. Dieses Verfahren weist somit eine hohe räumliche Genauigkeit auf. Ist die Satellitenbildszene jedoch bewölkt oder herrscht starker Rauch, verhindern sowohl die Wolken als auch der Wolkenschatten in diesen Bereichen ein Erkennen der Brandfläche. Hier liegt der große Vorteil der Radarsatelliten, da sie Wolken durchdringen können. Eine Synergie beider Verfahren soll die Genauigkeit des optischen Verfahrens nutzen, in bewölkten Bereichen jedoch auf die Brandflächendetektion mit Hilfe von Radar zurückgreifen. Der dafür entwickelte Algorithmus wird im Folgenden näher erläutert.

5.3.1 Algorithmus

Abbildung 5-17 zeigt das Schema der Kombination des optischen- und Radarverfahrens zur Brandflächendetektion. Die Klassifikation der beiden Verfahren läuft redundant zu den bereits beschriebenen Algorithmen zur Brandflächendetektion ab. Um die optische Genauigkeit nicht durch die Radar-Daten zu beeinträchtigen, werden in der *Software eCognition Developer* zwei verschiedene so genannte *maps* erstellt. Die optischen- und Radar-Daten können einzeln innerhalb eines Algorithmus segmentiert und klassifiziert werden. Neu in der Klassifikation des optischen Algorithmus sind die Ausweisung der störenden Wolken und deren Wolkenschatten. Zum Schluss der Klassifikation werden die Klassen soweit wie möglich zusammengefasst und vereinfacht, um in einem nächsten Schritt die Synchronisation der beiden *maps* zu ermöglichen. In einem letzten Schritt wird für die Klasse „Wolke“ auf das Klassifikationsergebnis des Radarbildes zurückgegriffen. Die folgenden Punkte erklären die einzelnen Schritte näher.

5.3.2 Segmentierung

Um die hohe Genauigkeit der optischen Daten nutzen zu können, müssen die Radar-Daten getrennt von den optischen segmentiert und klassifiziert werden. Dies kann in der *Software eCognition Developer* mit Hilfe der *map*-Funktion durchgeführt werden (Definiens AG 2010). Die Segmentierung wird für das aktive und das passive Verfahren zur Brandflächendetektion in zwei verschiedene *maps* aufgeteilt und unabhängig voneinander durchgeführt. Dabei wird

für beide Verfahren der bereits unter Punkt 5.1.6 und 5.2.3 erläuterte Segmentierungsalgorithmus beibehalten. Um Verwechslungen vorzubeugen erhalten die in beiden Verfahren generierten Level *Basislevel* und *Brandflächendetektion* jeweils den Zusatz *optisch* beziehungsweise *SAR*.

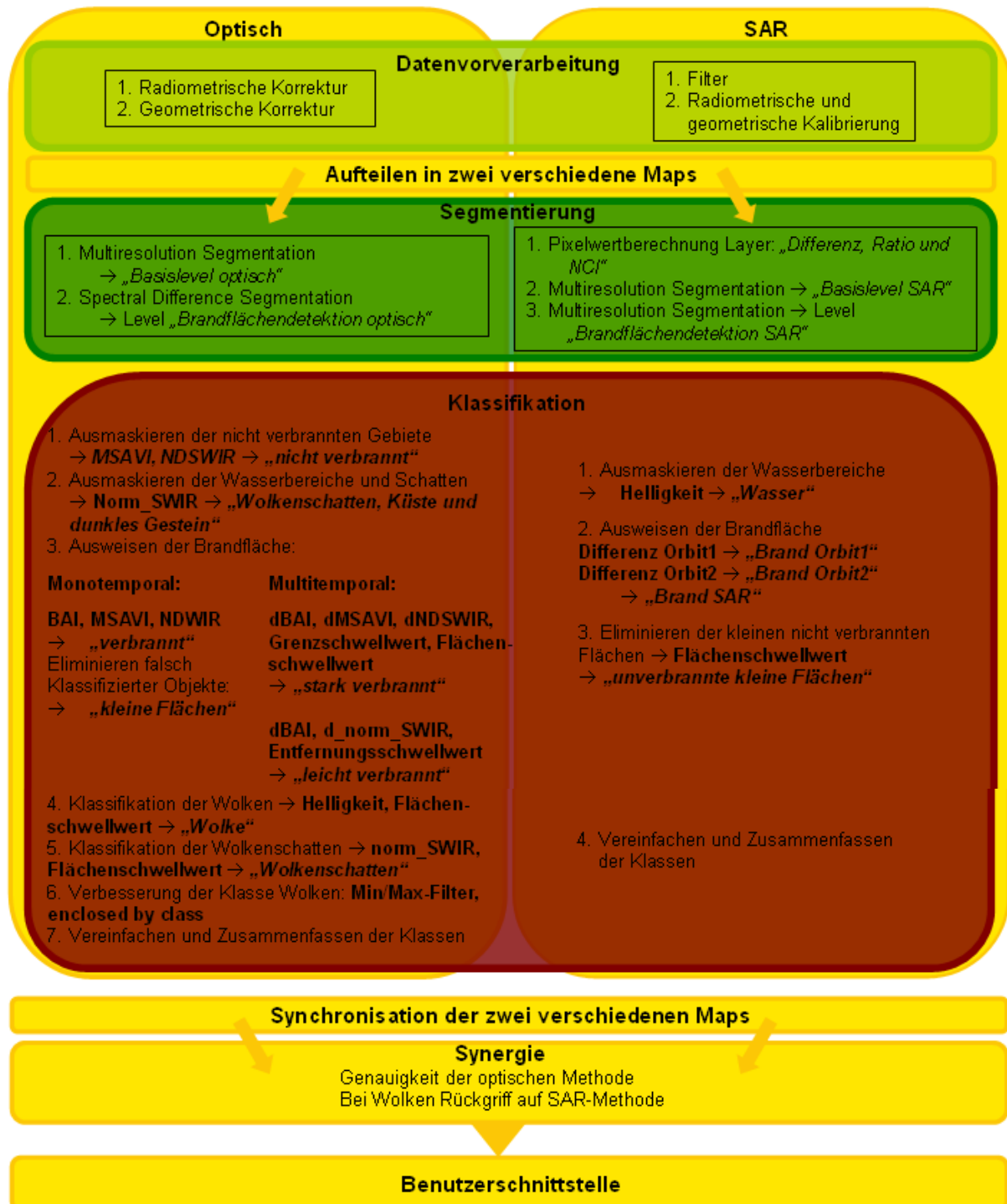


Abbildung 5-17: Schema der Kombination des optischen- und Radarverfahrens, eigene Darstellung

5.3.3 Klassifikation

Das unter Punkt 5.1.7 bereits erläuterte Klassifikationsverfahren der Brandflächendetektion mit passiven Satellitendaten wird komplett übernommen. Auch hier kann je nach Datengrundlage entweder das monotemporale oder das multitemporale Verfahren vom Benutzer ausgewählt werden. Nachdem das Klassifikationsschema redundant zu Punkt 5.1.7 durchgeführt wird, werden in einem zusätzlichen Schritt die Wolken und der Wolkenschatten klassifiziert. Um zu verhindern, dass das bereits zufrieden stellende Klassifikationsergebnis verändert werden kann, wird das Level „*Brandflächendetektion optisch*“ auf das Level „*Wolken und Wolkenschatten*“ kopiert. Auf diesem Level findet anschließend die Klassifikation der störenden Wolken und ihrer Schatten statt, wobei lediglich Objekte, die der Klasse „*nicht verbrannt*“ angehören, als „*Wolke*“ oder „*Wolkenschatten*“ ausgewiesen werden können. Zunächst werden die Wolken über ihre Helligkeit identifiziert. Hierbei werden vor allem im Bereich innerhalb von Städten sehr kleine Objekte als „*Wolke*“ fehlklassifiziert. Um dies zu verhindern, werden die bisherigen *Wolkenobjekte* zusammengefügt, und ein Flächenschwellwert definiert. Alle Objekte, die unter diesem Schwellwert liegen, werden der Klasse „*nicht Wolke*“ zugeordnet. Um den Wolkenschatten zu klassifizieren, wird das normalisierte mittlere Infrarot verwendet. Wie bereits unter Punkt 5.1.2 gezeigt, eignet sich das mittlere Infrarot am Besten um zwischen Wolkenschatten und der Brandfläche unterscheiden zu können. Liegt der Wert eines Objektes unter dem gewählten Schwellwert des mittleren Infrarots, wird dieses Objekt der Klasse „*Wolkenschatten*“ zugeordnet. Dies führt jedoch zu Fehlklassifikationen, wie zum Beispiel im Bereich großer Wasserflächen. Aufgrund dessen wird ein Flächenschwellwert eingeführt. Nur wenn der Flächenwert eines Objektes über diesem Schwellwert liegt gehört es der Klasse „*nicht Wolkenschatten*“ an. Besonders im Übergangsbereich zwischen Wolken und dem restlichen Satellitenbild, oder den Wolken und dem Wolkenschatten, befinden sich einige dünne Wolkenschlieren, die bis jetzt noch nicht erfasst werden konnten. Um auch diese Bereiche richtig zu klassifizieren wird der in *eCognition Developer* implementierte *Min/Max Filter* verwendet. Hierbei wird ein neuer *Layer* „*gefiltert*“ kreiert, in dem jedes Pixel je nach Fenstergröße die Differenz zwischen hellstem, dunkelstem und dem zentralen Pixelwert bekommt (Definiens AG 2010). Dieser Algorithmus wird gewählt, da der Kontrast von Wolken im Gegensatz zu ihrer sonstigen Umgebung besonders hoch ist. Die Objekte erfassen diese Übergangsbereiche oft nur unbefriedigend. Aufgrund dessen werden auf Pixelbasis die fehlenden Wolkenschlieren ermittelt. Hierbei wird ein Schwellwert des neu entstandenen Kontrast-Layers definiert. Überschreiten die Pixelwerte in unmittelbarer Nähe zur Klasse „*Wolke*“ den gewählten Wert, wächst das Objekt an. Dieser Schritt kann je nach Belieben des Nutzers mehrmals wiederholt werden. Grenzt ein bereits als „*nicht Wolke*“ klassifiziertes Objekt an ein Objekt der Klasse „*Wolke*“, wird es automatisch der Klasse „*Wolke*“ zugeordnet. Im Hinblick auf ein späteres Synchronisieren der beiden Maps, werden die Klassen „*Wolke*“ und „*Wolkenschatten*“ zur Klasse „*Wolke*“ zusammengefasst. Für eine homogene Erfassung dieser Bereiche wird der Algorithmus *enclosed by class* gewählt. Hierbei werden alle Objekte, die vollständig von der Klasse „*Wolke*“ umschlossen werden,

der Klasse „*Wolke*“ zugewiesen. Sind die störenden Bereiche zufriedenstellend ausgewiesen, wird die optische *map* so weit wie möglich vereinfacht. Dies ist notwendig, da die beiden *maps* später synchronisiert werden sollen. Dies dauert bei großen Satellitenbildszenen mit zu vielen Objekten sehr lange, oder überschreitet gänzlich den zugeschriebenen Speicherplatz des Programmes. Hierzu werden die als „*Wolke*“ ausgewiesenen Objekte auf das Level „*Brandflächendetektion*“ übertragen und das Level „*Wolke und Wolkenschatten*“ wird gelöscht. Um die Objektanzahl so weit wie möglich zu reduzieren, werden die Objekte der verbleibenden drei Klassen „*Wolke*“, „*nicht verbrannt*“ und „*verbrannt*“ zusammengefasst.

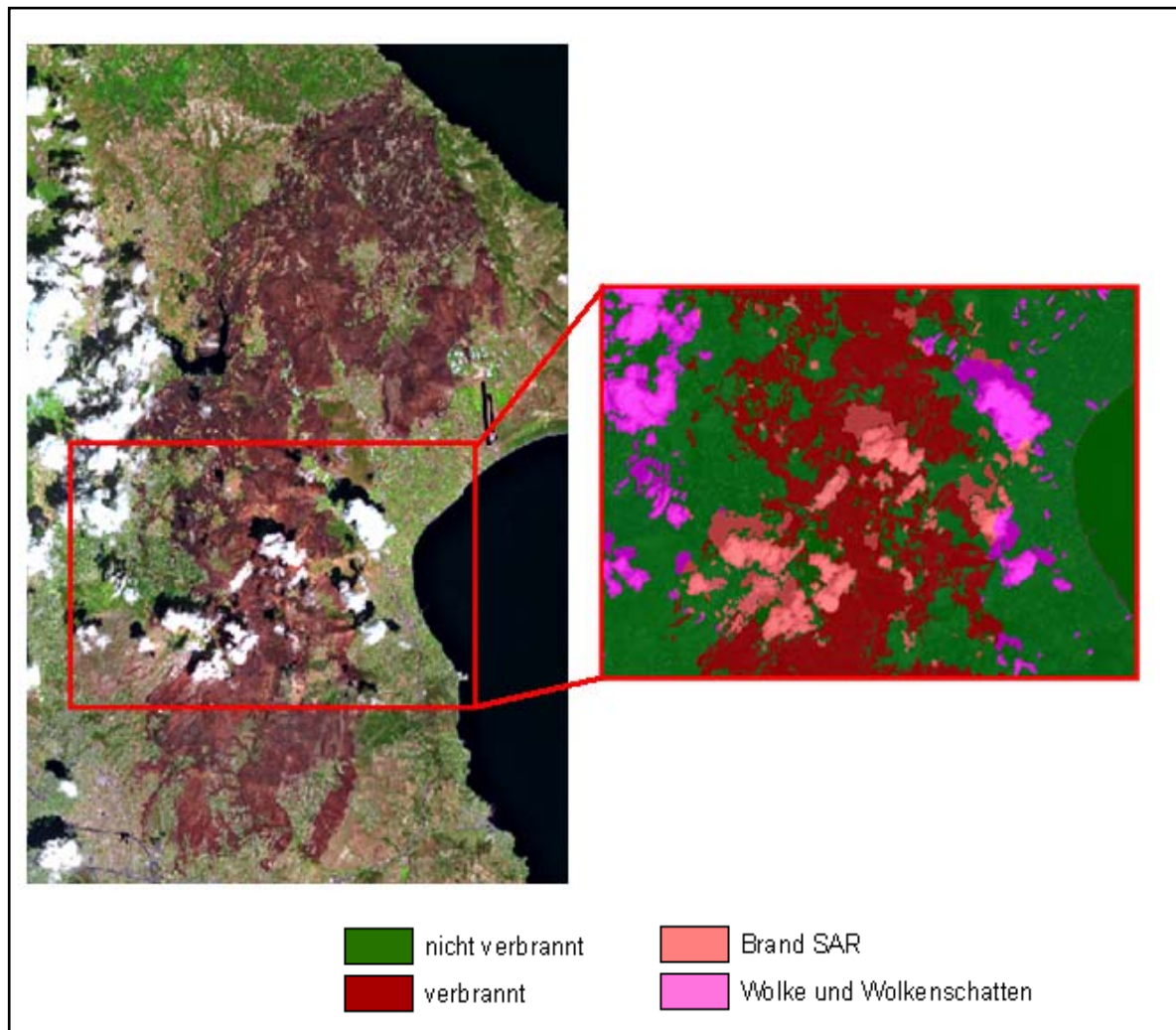


Abbildung 5-18: Synergie zwischen optischer- und Radar-Brandflächendetektion, eigene Darstellung

Das Ausweisen der Brandfläche in der SAR-*map* wird wie unter Punkt 5.2.4 beschrieben durchgeführt. Auch hier wird in einem letzten Schritt die SAR-*map* vereinfacht. Alle verbrannten Bereiche werden zusammengefasst, und alle restlichen Objekte werden der Klasse „*Wasser*“ zugeordnet.

In einem letzten Schritt werden die beiden *maps* synchronisiert. Das bedeutet, aus den beiden Maps „*optisch*“ und „*SAR*“ entsteht eine *map*, die zwei verschiedene Level enthält, ein Level

„*Brandflächendetektion optisch*“ und ein Level „*Brandflächendetektion SAR*“. Anschließend werden alle Objekte, die im Level „*Brandflächendetektion optisch*“ der Klasse „*Wolke*“ angehören und im übergeordneten Level „*Brandflächendetektion SAR*“ der Klasse „*Brand SAR*“ angehören, auch im Level *Brandflächendetektion optisch* der Klasse „*Brand SAR*“ zugeordnet. Abbildung 5-18 zeigt einen Ausschnitt der Brandfläche in Griechenland. Die Wolken, die die Brandfläche im optischen Satellitenbild verdecken können mit Hilfe des Radar-Brandflächendetektionsverfahrens als verbrannte oder unverbrannte Gebiete identifiziert werden.

5.3.4 Benutzerschnittstelle

Die Kombination der aktiven und passiven Verfahren zur Brandflächendetektion umfasst zahlreiche verschiedene Klassifikationsmethoden. So kann in der hierfür generierten Benutzerschnittstelle im passiven Verfahren zwischen monotemporaler und multitemporaler Brandflächendetektion ausgewählt werden. Der Nutzer kann durch Anklicken der einzelnen Schritte selbst bestimmen, welche *Action Definitions* er hinzufügen möchte. Wichtig ist jedoch, dass die vordefinierte Reihenfolge und Benennung der einzelnen *Layer* beim Laden der einzelnen Satellitenbilder beachtet wird. Die Brandflächendetektion sowohl des passiven als auch des aktiven Verfahrens funktioniert genauso wie bereits unter Punkt 5.1.8 und 5.2.5 erläutert wurde. Neu ist hier das Aufteilen in zwei verschiedene *maps* zu Beginn des Algorithmus, die Klassifikation von Wolken und Wolkenschatten, und das Synchronisieren der beiden *maps* zum Schluss des Algorithmus. Die Klassifikation der Wolken und Wolkenschatten umfasst vier *Action Definitions*, deren Schwellwerte vom Nutzer bestimmt werden müssen. So sind die Schwellwerte für die Helligkeit, den Kontrast und das normalisierte mittlere Infrarot zu bestimmen. Das Anwachsen und Schließen der Klasse „*Wolke*“ kann, wie bereits erwähnt, beliebig oft durchgeführt werden. Alle übrigen unter Punkt 5.3.3 nötigen Schritte zur Klassifikation laufen im Hintergrund ab, werden jedoch zum besseren Verständnis für den Nutzer unter der Beschreibung der *Action Definitions* oder in der Klassenbeschreibung der einzelnen Klassen näher erklärt. Auch die Benutzerschnittstelle des Kombinationsverfahrens zur Brandflächendetektion bietet eine manuelle Editierfunktion für die Klasse „*Wolke*“, um noch nicht erfasste, oder falsch erfasste Objekte selbst klassifizieren zu können.

In Kapitel 5 wurden die im Zuge dieser Diplomarbeit entstandenen drei Algorithmen zur Brandflächendetektion eingehend beschrieben.

Mit Hilfe des mittleren Infrarots kann eine Fehlklassifikation spektral ähnlicher Bereiche vermieden werden.

Das optisch multitemporale Verfahren ermöglicht zusätzlich ein Feststellen des Verbranntheitsgrades.

Es wurde ermittelt, dass eine Brandflächendetektion mit TerraSAR-X Daten möglich ist und gute Ergebnisse erzielt.

Dadurch können in einer Kombination aus beiden Verfahren wertvolle Synergieeffekte entstehen. So kann sowohl das räumlich genaue optische Verfahren zur Brandflächendetektion genutzt werden, als auch in durch Wolken oder Wolkenschatten verdeckten Bereichen auf das Radar-Verfahren zurückgegriffen werden.

Kapitel 6 führt die Klassifikationsgenauigkeit der einzelnen Verfahren näher aus.

6. Genauigkeitsanalyse

Die Genauigkeitsanalyse stellt einen essenziellen Überprüfungsschritt für das Klassifikationsergebnis jedes entwickelten Verfahrens dar. Nur wenn ausreichende Genauigkeiten erfüllt werden, ist das Verfahren von Wert. Der Klassifikationsfehler wird typischerweise statistisch quantifiziert, indem man das Klassifikationsergebnis mit unabhängigen Referenzdaten vergleicht. Dies können zum Beispiel Feldmessungen vor Ort (*ground truth* Daten), andere höher auflösende Satellitendaten oder Orthophotos sein (Kennedy et al. 2009).

Eine gute Genauigkeitsanalyse beinhaltet nach Congalton 1993 eine *overall accuracy*, die *producer's accuracy*, die *user's accuracy* (auch *consumer's accuracy* genannt) und den Kappa Koeffizienten. Diese werden meist in Form einer Kontingenzmatrix (auch Konfusionsmatrix oder Fehlermatrix genannt) dargestellt.

Die *overall accuracy* beinhaltet die komplette Übereinstimmung des Klassifikationsergebnisses und der Referenzkarte, wobei die *producer's* und *user's accuracy* nicht beachtet werden.

Die *producer's accuracy* ist eine referenzbasierte Genauigkeit und gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein tatsächlich verbrannter Pixel auch im Klassifikationsergebnis als Brand angegeben wird.

Die *user's accuracy* ist eine kartenbasierte Genauigkeit und gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein im Klassifikationsergebnis als Brand ausgewiesener Pixel auch in Wirklichkeit verbrannt ist (Foody 2006, Congalton 1993).

Der Kappa-Koeffizient drückt das Übereinstimmungsmaß aller Pixel der Klassifizierten und der Referenzfläche aus. Sein Wertebereich geht von Null bis Eins. Je größer der Wert, umso höher ist die Korrelation, und damit umso besser das Klassifikationsergebnis (Foody 2006).

6.1 Genauigkeit der entwickelten Verfahren

Ground truth Daten sind bei Waldbränden schwer zu erstellen, und fehlen daher bei den meisten Brandereignissen. Im Zuge dieser Arbeit werden verschiedene Behörden um Referenzdaten gebeten. Es war jedoch nicht möglich *ground truth* Daten zu beschaffen. Aufgrund dessen wird entschieden, die Brandfläche selbst anhand der SPOT 5 Satellitenbildszenen sowohl von Griechenland als auch von La Palma zu digitalisieren und anhand dieser Referenzfläche die Genauigkeitsanalyse durchzuführen. Das Digitalisieren wird mit Hilfe der Software *eCognition Developer* und *ArcGis* durchgeführt. Das

Klassifikationsergebnis der Brandflächendetektion und die digitalisierte Karte der Waldbrände werden miteinander verglichen.

Da das Klassifikationsergebnis aller entwickelten Verfahren lediglich die zwei Klassen „verbrannt“ und „nicht verbrannt“ enthält, bietet sich ein flächenhafter Vergleich an. Dabei wird in der *Software Envi* das Klassifikationsergebnis mit der digitalisierten Referenzfläche verschnitten, und daraus die Kontingenzmatrix errechnet. Die Genauigkeitsanalyse wird sowohl für das monotemporale Verfahren, das multitemporale Verfahren, als auch für das Radar Verfahren in den Gebieten durchgeführt, an denen sie entwickelt wurden. Tabelle 6-1 zeigt diese drei Verfahren mit den jeweiligen Ergebnissen der Genauigkeitsanalyse.

Verfahren	Gebiet	Overall accuracy	Producer`s accuracy	User`s accuracy	Kappa Koeffizient
Optisch: Monotemporal	Griechenland	99,71 %	98,22 %	99,61 %	0,99
Optisch: Multitemporal	La Palma	99,91 %	95,56 %	99,09 %	0,97
Radar: Ein Orbit	Griechenland (nördliche Brandfläche, HH)	71,13 %	37,76 %	49,00 %	0,24
Radar: Zwei Orbits	Griechenland (nördliche Brand- fläche, VV / HH)	77,91 %	66,93 %	52,17 %	0,4389

Tabelle 6-1: Genauigkeitsanalyse, eigene Darstellung

Die Genauigkeitsanalyse liefert für die optischen Brandflächendetektionsverfahren sehr gute Ergebnisse. Sowohl bei dem monotemporalen als auch bei dem multitemporalen Verfahren liegen die *producer`s* und die *user`s accuracy* über 95 %. Der Kappa Koeffizient als Korrelationsmaß zwischen der Referenzfläche und dem Klassifikationsergebnis, erreicht bei beiden fast 1, was die hohe Übereinstimmung weiter bestätigt.

Das Radar-Verfahren hingegen erzielt nicht so gute Ergebnisse. Hier zeigt sich in Zahlen das bereits visuell erkannte Ergebnis, dass die Brandfläche zwar im großen und ganzen gut erkannt werden kann, aber ein Detektieren der kleineren verbrannten beziehungsweise nicht verbrannten Gebiete nicht möglich ist. Ebenfalls spiegelt sich in der Kontingenzmatrix wieder, dass das Verfahren mit zwei Flugrichtungen gegenüber dem Verfahren mit nur einem Orbit eine deutlich höhere Genauigkeit aufweist.

Wie bereits erwähnt werden die Referenzflächen der Genauigkeitsanalyse selbst anhand der SPOT 5 Satellitenbilddaten der Waldbrandflächen in Griechenland und La Palma in der

Software ArcGis und eCognition Developer digitalisiert. Weitere Referenzflächen stehen im Zuge dieser Diplomarbeit nicht zur Verfügung. Es besteht daher keine Möglichkeit festzustellen, ob es sich bei den durch Wolken oder Wolkenschatten verdeckten Bereichen um eine Brandfläche handelt oder nicht. Würde daher für das Kombinationsverfahren eine Genauigkeitsanalyse mit Hilfe der selbst erstellten Referenzflächen durchgeführt werden, würde diese ein schlechteres Ergebnis erbringen als die Genauigkeitsanalyse des optischen monotemporalen oder multitemporalen Algorithmus. Daher wird mangels Referenzflächen auf eine Genauigkeitsanalyse der Kombination aus dem passiven und aktiven Verfahren zur Brandflächendetektion verzichtet.

6.2 Genauigkeit der Übertragbarkeit der Verfahren

Die gute Übertragbarkeit der drei entwickelten Verfahren auf andere mediterrane Gebiete wurde bereits unter den Punkten 5.1.9 und 5.2.6 angesprochen. An dieser Stelle soll der visuelle Eindruck mit Zahlen untermauert werden. Um die Genauigkeit des entwickelten Brandflächendetektionsverfahrens übertragen auf die Waldbrandgebieten von Sardinien 2009 und Griechenland 2007 zu zeigen, wird ein flächenhafter Vergleich ohne das Verschneiden des Klassifikationsergebnisses mit der Referenzfläche als ausreichend angesehen. Tabelle 6-2 zeigt für das optische monotemporale, multitemporale und das Radar-Verfahren die detektierte Fläche in Hektar, jeweils mit der Referenzfläche als Vergleich. Als Vergleichsreferenz dienen die jeweils im Zuge der ZKI-Katastrophenkartierung entstandenen Brandflächen.

Verfahren	Gebiet des Übertragbarkeitstests	Datengrundlage	Klassifikationsergebnis der Brandfläche in Hektar	ZKI-Referenzfläche in Hektar
optisch: monotemporal	Sardinien	SPOT 5 Satellitenbildszene vom 28.07. 2009	15.348	15.436
optisch: monotemporal	Griechenland	SPOT 5 Satellitenbildszene vom 01.09.2007	7.814	8.186
optisch: multitemporal	Griechenland	SPOT 5 Satellitenbildszenen vom 15.03.2007 und 01.09.2007	7.738	8.186
Radar: multitemporal	La Palma	TerraSAR-X Satellitenbildszenen vom 13.12.2007 und 09.08.2009	1.707,6	2.786 „stark verbrannt“ 1.771,75

Tabelle 6-2: Übertragbarkeit der Verfahren, eigene Darstellung

Da die Übertragung des multitemporalen Verfahrens auf die weder georeferenzierten noch atmosphärenkorrigierten Satellitenbildszenen Sardinien bereits visuell ein unbefriedigendes Ergebnis liefern (siehe Punkt 5.1.9), wird es im flächenhaften Vergleich nicht mehr berücksichtigt. Das Klassifikationsergebnis der verschiedenen Brandflächen weist in allen drei entwickelten Verfahren etwas geringere Hektarzahlen als die ZKI-Referenzfläche auf, kann jedoch gute Ergebnisse erzielen.

Wie unter Punkt 5.2.4 gezeigt ist die Brandflächendetektion mittels TerraSAR-X Daten von der Ausgangsvegetation abhängig. Daher können die „leicht verbrannten“ Gebiete La Palmas nicht erfasst werden. Dies erklärt den abweichenden Flächenwert der erfassten Brandfläche von der ZKI-Referenzfläche. Ein Flächenvergleich mit den als „stark verbrannt“ klassifizierten Gebieten der Insel zeigt jedoch einen ähnlichen Wert.

Zusammenfassend zu Kapitel 6 lässt sich feststellen, dass sowohl das monotemporale als auch das multitemporale Verfahren zur Brandflächendetektion sehr gute Genauigkeitswerte liefern. Die Brandflächenerfassung mit Hilfe von TerraSAR-X Daten erbringt ein deutlich besseres Ergebnis falls Daten zwei verschiedener Flugrichtungen vorliegen. Die Brandflächendetektion kann jedoch nicht die Genauigkeiten des optischen Verfahrens erreichen. Die Übertragbarkeitstests der drei verschiedenen Verfahren konnten im Vergleich zu den ZKI-Referenzflächen von Griechenland, Sardinien und La Palma gute Ergebnisse erzielen.

7. Fazit und Ausblick zur Brandflächendetektion

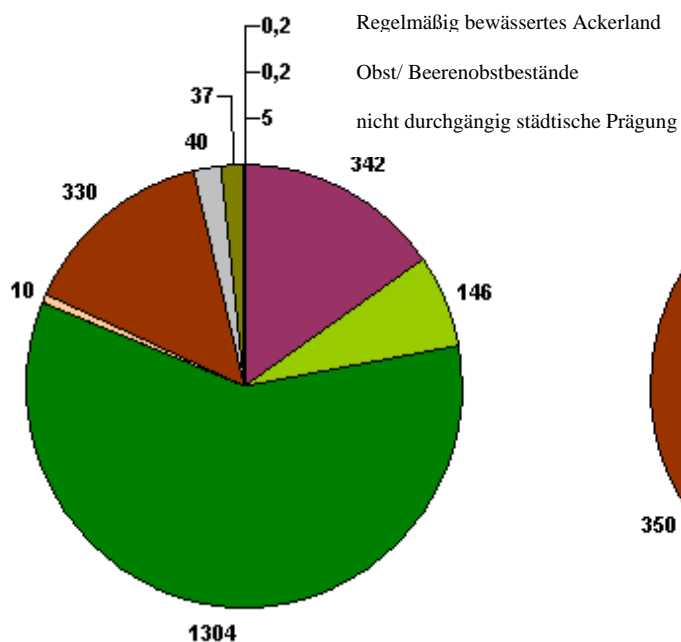
Am Ende dieser Diplomarbeit werden die drei objektbasierten, semi-automatischen Algorithmen zur Brandflächendetektion im mediterranen Raum, die sowohl auf einer monotemporalen als auch multitemporalen Datengrundlage und auf Expertenwissen basieren, diskutiert und ein weiterführender Ausblick zur Brandflächendetektion gegeben.

Der monotemporale Algorithmus zeigte, dass Waldbrände mit Hilfe von SPOT 5 Satellitenbilddaten genau erfasst werden können. Sowohl kleine, nicht verbrannte Gebiete innerhalb der Brandfläche, als auch verbrannte Flächen außerhalb der Hauptbrandfläche konnten gut erkannt werden. Durch die Berücksichtigung des mittleren Infrarots konnte eine Fehlklassifikation von Wolkenschatten, Küstenbereichen oder dunklen Gesteinen weitestgehend verhindert werden.

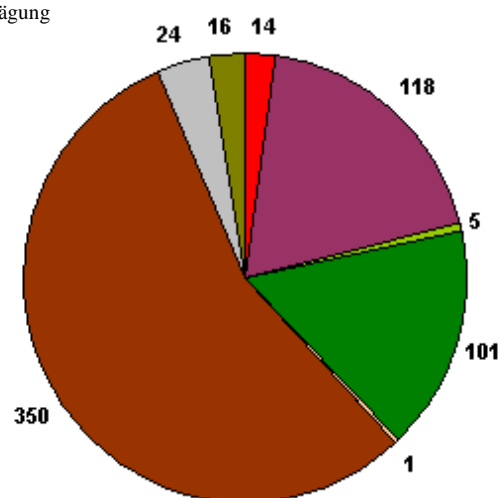
Das multitemporale Verfahren konnte die Genauigkeit der Brandflächendetektion in spektral ähnlichen Gebieten deutlich verbessern. Darüberhinaus bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, den Verbranntheitsgrad eines Waldbrandes zu ermitteln. Abbildung 7-1 zeigt die entstandenen Schäden in La Palma, die die Waldbrände an den Vegetationsbeständen verursacht haben. Die Landbedeckungsklassen basieren auf den CORINE 2000 Daten und werden in Hektar aufgelistet. Die Gebiete werden nach den ermittelten Klassen „*leicht verbrannt*“ und „*stark verbrannt*“ getrennt. Dies verdeutlicht den Unterschied der verbrannten Vegetation der beiden Klassen. So ist in den stark verbrannten Bereichen vorwiegend Nadelwald abgebrannt, während in den leicht verbrannten Gebieten überwiegend Hartlaubbewuchs durch das Feuer zerstört wurde. Die Brandfläche in Griechenland weist eine stärkere Diversifizierung der verbrannten Landbedeckungsklassen auf, und wird aus Übersichtsgründen in Tabellenform dargestellt. Tabelle 7-1 listet die einzelnen Landbedeckungsarten mit der jeweiligen Flächenangabe in Hektar der verbrannten Gebiete auf.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ermittelt werden, dass eine Brandflächendetektion auf Basis multitemporaler TerraSAR-X Daten nicht nur möglich ist, sondern auch gute Ergebnisse erzielt. Die Umrisse der Brandfläche konnten sowohl in Griechenland, als auch in La Palma gut erfasst werden. Es war jedoch nicht möglich kleinere, nicht verbrannte Gebiete innerhalb der Brandfläche, oder verbrannte Flächen außerhalb der Hauptbrandfläche zu erkennen. Als entscheidende Faktoren zur Brandflächendetektion erwiesen sich die vorher vorherrschende Landbedeckung, verschiedene Flugrichtungen während der Satellitenbilddaufnahme, und die Polarisation. Abbildung 7-1 stellt ebenfalls die auf Basis von TerraSAR-X Daten ermittelten verbrannten Landbedeckungsarten der Brandfläche dar. Hier zeigt sich im Vergleich zu den

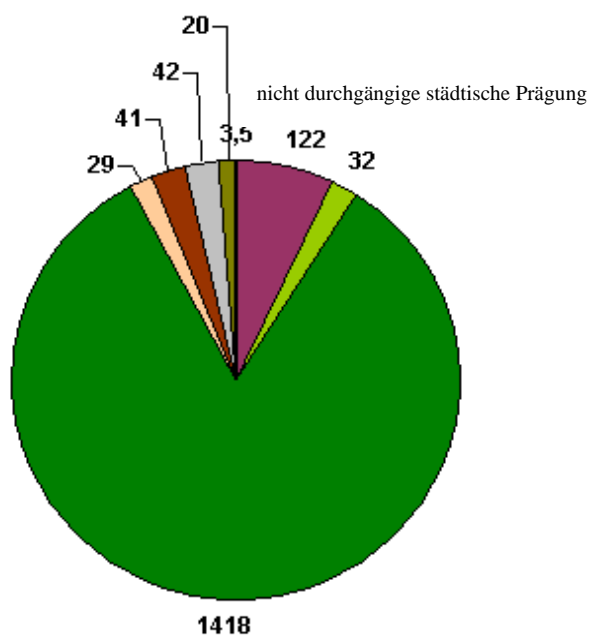
Landbedeckung der stark verbrannten Gebiete in La Palma nach CORINE



Landbedeckung der leicht verbrannten Gebiete in La Palma nach CORINE



Landbedeckung der TerraSAR-X Brandfläche in La Palma nach CORINE



- nicht durchgängig städtische Prägung
- Weinbauflächen
- Wiesen und Weiden
- Nadelwälder
- Heiden und Moorheiden
- Hartlaubbewuchs
- Felsflächen ohne Vegetation
- Flächen mit spärlicher Vegetation
- Regelmäßig bewässertes Ackerland
- Obst/ Beerenobstbestände

alle Angaben in Hektar

Abbildung 7-1: Verbrannte Landbedeckung in La Palma nach CORINE, eigene Darstellung

verbrannten Gebieten des optischen Algorithmus, dass überwiegend Nadelwälder erfasst werden konnten, es hingegen nicht möglich war verbrannte Hartlaubgewächse zu erkennen.

Die Grundvoraussetzung eines schnell anwendbaren und übertragbaren Verfahrens zur Brandflächendetektion konnte in allen drei Methoden umgesetzt werden. Um die Benutzung des Verfahrens für verschiedene Anwender so schnell und leicht wie möglich zu gestalten, wurde eine Benutzeroberfläche generiert.

Landbedeckungsklasse	Verbranntes Gebiet in Hektar
nicht durchgängige städtische Prägung	316
Industrie/Gewerbeflächen	9
Baustellen	381
nicht bewässertes Ackerland	12
Weinbauflächen	277
Wiesen und Weiden	8
Komplexe Parzellenstruktur	570
Landwirtschaftlich genutztes Land	621
Nadelwälder	35
Natürliches Grünland	8
Hartlaubbewuchs	300
Wald/Strauch Übergangsstadien	565
Sümpfe	0,2
Wasserflächen	0,1
Gesamt	3.102,3

Tabelle 7-1: Landbedeckung des verbrannten Gebietes in Griechenland, eigene Darstellung

Der entwickelte Algorithmus erweist sich somit als ein starkes *Tool* zur Brandflächendetektion, das sowohl im optischen als auch im Radar-Verfahren gute Klassifikationsergebnisse erzielen konnte. Im Zuge dieser Diplomarbeit konnten jedoch nicht alle möglichen Ansätze berücksichtigt werden. So bietet das Verfahren weiteren Forschungsbedarf und Verbesserungsmöglichkeiten:

Durch Feldmessungen vor Ort könnte das multitemporale Verfahren hinsichtlich seiner Genauigkeit der Unterscheidung in „*leicht verbrannte*“ und „*stark verbrannte*“ Gebiete überprüft werden. Diese Ergebnisse könnten zu einer besseren Validierung und gegebenenfalls Erweiterung des Algorithmus beitragen. Gleiches gilt für die Kombination des optischen und Radar-Verfahrens, da eine Validierung des Klassifikationsergebnisses mangels Referenzflächen im Zuge dieser Arbeit nicht möglich war.

Ein Problem des entwickelten Algorithmus stellen kleine, spektral ähnliche Objekte dar. Der hierfür definierte Schwellwert kann bewirken, dass sehr kleine verbrannte Bereiche innerhalb der Hauptbrandfläche nicht als Brandfläche erfasst werden.

Ebenfalls bietet der entwickelte Algorithmus Verbesserungsbedarf hinsichtlich einer besseren Verhinderung der Fehlklassifikation spektral ähnlicher Gebiete.

Der im Zuge dieser Arbeit entwickelte Algorithmus basiert auf TerraSAR-X *Stripmap*-Daten. Eine weiterführende Untersuchung von höher aufgelösten TerraSAR-X *Spotlight* Satellitenbildszenen könnte zu einer besseren Klassifikationsgenauigkeit der Brandfläche führen.

Ebenfalls ergibt sich weiterer Forschungsbedarf in einer stärkeren Verflechtung von optischen und Radar-Daten. Innerhalb dieser Diplomarbeit gelang bereits eine Kombination beider Verfahren, indem bei Bewölkung des optischen Satellitenbildes auf Radar-Daten zurückgegriffen wird. Eine Verschmelzung der Bilddaten dieser unterschiedlichen Aufnahmesysteme und damit unterschiedlichem Bildinformationsgehalt, kann die Brandflächendetektion weiter verbessern. Durch den Start des neuen Radar-Satelliten Tandem-X am 21.07.2010, der als Zwillingsatellit zu TerraSAR-X neue Erkenntnisse der Erdoberfläche liefern wird, ergeben sich zahlreiche neue Forschungsfelder.

Das neu entwickelte *Fire-Tool* bietet Erweiterungsbedarf hinsichtlich der Implementierung verschiedener Sensoren. Ein Auswahlmodus für alle zur Katastrophenkartierung zur Verfügung stehenden Sensoren und sich danach richtende Algorithmen könnte zur weiteren Optimierung der Brandflächendetektion beitragen. Dabei sind die jeweiligen Bänder der einzelnen Sensoren zu berücksichtigen und weitere Algorithmen zur Brandflächendetektion zu entwickeln.

Ebenfalls stellt die auf Expertenwissen basierende Schwellwertfindung ein Problem dar, da für jeden Waldbrand neue Werte in einem iterativen Prozess ermittelt werden müssen. Als zukünftige Weiterentwicklung des *Fire-Tools* könnten automatisch aus den Satellitendaten extrahierte Schwellwerte die Brandflächendetektion verbessern.

Die hier gewählte Vorprozessierung sowohl der optischen als auch der Radar-Daten stellt für den entwickelten Algorithmus optimale Voraussetzungen dar. Kann dieses Verfahren aufgrund von Zeitmangel im Zuge einer Krisenkartierung nicht vollständig durchgeführt werden, ist mit einem schlechteren Klassifikationsergebnis zu rechnen. Auch hier bietet sich Forschungsbedarf hinsichtlich einer Optimierung der Datenbestellung, Vorverarbeitung und Implementierung in den Algorithmus.

Die Bedeutung eines immer weiter ausgebauten, schneller und genauer werdenen Feuer-Monitorings mit Hilfe der Fernerkundung nimmt vor dem Hintergrund des weltweiten

Klimawandels immer stärker zu. Durch einen erhöhten Temperaturanstieg, geringere Niederschläge und die Zunahme extremer Wetterereignisse wie zum Beispiel Dürren und Stürme wird sich die Feuersaison nicht nur verlängern, sondern die gefährdeten Gebiete werden sich vom mediterranen Raum weiter in den nördlichen Bereich Europas ausdehnen (IPCC 2007). Als Beispiel sei hier ein Waldbrand im Mai 2010 angeführt, der sich in Tirol, Österreich, ereignete. Trotz der frühen Jahreszeit im Jahr 2010 konnte bereits ein verheerender Brand ausbrechen, was ein Indikator für zukünftige, häufigere Feuerereignisse auch in mitteleuropäischen Gebieten sein kann. Hier bietet sich Forschungsbedarf um ein Weiterentwickeln des Verfahrens zur Brandflächendetektion über den mediterranen Raum hinaus in nördlichere Bereiche Europas zu ermöglichen.

Die Fernerkundung verfügt im Bereich des Feuer-*Monitorings* über ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Hierzu zählen neben einer schnellen und genauen Erfassung der Brandfläche im Zuge einer Katastrophenkartierung für die Ersthilfe für Menschen vor Ort auch Regenerations-, Wiederaufforstungs-, Erosions- oder Degradationsbeobachtungen über Brandflächen. Die ermittelten Waldbrandgebiete können den Einsatzkräften vor Ort wertvolle Informationen zur Koordination bei Waldbränden liefern. Durch die Zuhilfenahme digitaler Geländemodelle, Landbedeckungskarten und der vorherrschenden Wetterverhältnisse zum Brandzeitpunkt kann es gelingen Informationen über das Ausbreitungsverhalten eines Brandes zu extrahieren und zukünftige Prognose-Modelle zu erstellen. Hierbei sollen alle zur Verfügung stehenden Sensoren und Systeme eingebunden werden. In dieser Diplomarbeit wurde in einer Kombination aus optischen und Radar-Daten dafür ein Anfang gemacht.

Literaturverzeichnis

AGEE, J. K. (1993): FIRE ECOLOGY OF PACIFIC NORTHWEST FORESTS, WASHINGTON, D. C., ISAND PRESS

ALBERTZ, J. (2007): EINFÜHRUNG IN DIE FERNERKUNDUNG, 3. AUFLAGE, DARMSTADT, WISSENSCHARFTLICHE BUCHGESELLSCHAFT

ALBERTZ, J. & WIGGENHAGEN, M. (2008): TASCHENBUCH ZUR PHOTOGRAMMETRIE UND FERNERKUNDUNG, WICHMANN

ALONSO-BENITO, A., HERNANDEZ-LEAL, P.A., GONZALEZ-CALVO, A., ARBELO, M., BARRETO, A. (2008): ANALYSIS OF DIFFERENT METHODS FOR BURNT AREA ESTIMATION USING REMOTE SENSING AND GROUND TRUTH DATA, IN: IEEE, GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS, S. 828 - 831

ARINO, O., PICCOLINI, I., KASISCHKE, E., SIEGERT, F., CHUVIECO, E., MARTÍN, P., LI, Z., FRASER, R., EVA, H., STROPPIANA, D., PEREIRA, J., SILVA, J.M.N., ROY, D., BARBOSA, P.M. (2001): METHODS OF MAPPING SURFACES BURNED IN VEGETATION FIRES, IN: AHERN, F. (HRSG.): GLOBAL AND REGIONAL VEGETATION FIRE MONITORING FROM SPACE: PLANNING A COORDINATED INTERNATIONAL EFFORT, S. 227 – 257

BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000): MULTIREOLUTION SEGMENTATION - AN OPTIMIZATION APPROACH FOR HIGH QUALITY MULTI-SCALE IMAGE SEGMENTATION, IN: STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIESEBNER, G (HRSG.): ANGEWANDTE GEOGRAPHISCHE INFORMATIONENVERARBEITUNG, BEITRÄGE ZUM AGIT-SYMPOSIUM SALZBURG 2000, KARLSRUHE, S. 12–23

BAMLER, R., REINARTZ, P., RIEDLINGER, T., SCHROEDER, M. (2006): MODERNE RAUMFAHRTTECHNIKEN FÜR PRÄVENTION BEI NATURKATASTROPHEN UND DAS KRISENMANAGEMENT, BEITRÄGE ZUR KONFERENZ „FUTURE SECURITY“ VOM 4.-5.7.2007 IN KARLSRUHE, FRAUNHOFER

BARBOSA, ET AL. (1998): COMPOSITING CRITERIA FOR BURNED AREA ASSESSMENT USING MULTITEMPORAL LOW RESOLUTION SATELLITE DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 65, S. 38-49

BARDUCCI, A., MARCOIONNI, P., PIPPI, I., POGGESI, M., CAVAZZINI, A., DE PAULIS R., PIZZAFERRI, G. (2002): MONITORING OF ACTIVE FIRE BY THE AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER MIVIS, IN: BEGNI, G. (HRSG): OBSERVING OUR ENVIRONMENT FROM SPACE, SWETS AND ZEITLINGER, NIEDERLANDE, S. 103 -111

BLASCHKE, T (2010): OBJECT BASED IMAGE ANALYSIS FOR REMOTE SENSING, IN: ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, VOLUME 65, ISSUE 1, S. 2 – 16

BLASCHKE, T. & STROBL, J. (2001): WHAT`S WRONG WITH PIXELS? SOME RECENT DEVELOPMENTS INTERFACING REMOTE SENSING AND GIS, IN: GEOBIT 6, 6, S. 12-17

BLASCHKE, T. (2002): FERNERKUNDUNG UND GIS, NEUE SENSOREN - INNOVATIVE METHODEN, HEIDELBERG, WICHMANN

BOER, M., MACFARLANE, C., NORRIS, J., ROHAN, S. (2008): MAPPING BURNED AREAS AND BURN SEVERITY PATTERNS IN SW AUSTRALIAN EUCALYPT FOREST USING REMOTELY-SENSED CHANGES IN LEAFF AREA INDEX, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, H. 112, S. 4358–4369

BOLLE, H.-J., ECKARDT, M., KOSLOWSKY, D., MASELLI, F., MELIÁ-MIRALLES, J., MENENTI, M., OLESEN, F.-S., PETKOV, L., RASOOL, I., VAN DE GRIEND A. (HRSG) (2006): MEDITERRANEAN LAND-SURFACE PROCESSES ASSESSED FROM SPACE, SPRINGER

BOSCHETTI, L. (2003): A MULTITEMPORAL ALGORITHM FOR BURNED AREA DETECTION IN MEXICAN WOODLAND AND SHRUBLAND ENVIRONMENT WITH SPOT-VEGETATION DATA, IN: IEEE, VOL. 2, S. 1293 - 1295

BOURGEAU-CHAVEZ, L., KASISCHKE E., FRENCH, N. (1995): THE DETECTION AND INTERPRETATION OF ALASKAN FIRE-DISTURBED BOREAL FOREST ECOSYSTEMS USING ERS-1 SAR IMAGERY, IN: IEEE, S. 1246–1248

BRUNIQUEL, J. & LOPES, A. (1997): MULTI-VARIATE OPTIMAL SPECKLE REDUCTION IN SAR IMAGERY, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 18, 3, S. 603 – 627

BUCKREUSS, S. & SCHÄTTLER, B. (2010): THE TERRASAR-X GROUND SEGMENT, IN: IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 48, NO. 2, S. 623 – 632

CARLEER, A. P., DEBEIR, O., WOLFF, E. (2005): ASSESSMENT OF VERY HIGH SPATIAL RESOLUTION SATELLITE IMAGE SEGMENTATIONS, IN: PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING, H. VOL. 71, NO. 11, S. 1285–1294

CHAND, T. K., BADARINATH, K., PRASAD, V. K., MURTHY, M., ELVIDGE, C. D., TUTTLE, B. T. (2006): MONITORING FOREST FIRES OVER THE INDIAN REGION USING DEFENSE METEOROLOGICAL SATELLITE PROGRAM-OPERATIONAL LINESCAN SYSTEM NIGHTTIME SATELLITE DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 103, S. 165 – 178

CHEN, X., VIERLING, L., DEERING, D. (2005): A SIMPLE AND EFFECTIVE RADIOMETRIC CORRECTION METHOD TO IMPROVE LANDSCAPE CHANGE DETECTION ACROSS SENSORS AND ACROSS TIME, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 98, S. 63 – 79

CHUVIECO, E. (2009): GLOBAL IMPACTS OF FIRE, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): EARTH OBSERVATION OF WILDLAND FIRES IN MEDITERRANEAN ECOSYSTEMS, SPRINGER, S. 1 – 11

CHUVIECO, E., ENGLEFIELD, P., TRISCHENKO A. P., LUO, Y. (2008): GENERATION OF LONG TIME SERIES OF BURN AREA MAPS OF THE BOREAL FOREST FROM NOAA-AVHRR COMPOSITE DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 112, S. 2381 - 2396

CHUVIECO, E. & KASISCHKE, E. S., (2007): REMOTE SENSING INFORMATION FOR FIRE MANAGEMENT AND FIRE EFFECTS ASSESSMENT, IN: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOLUME 112, GO1S90

CHUVIECO, E., MARTÍN, M. P., PALACIOS, A. (2002): ASSESSMENT OF DIFFERENT SPECTRAL INDICES IN THE RED-NEAR-INFRARED SPECTRAL DOMAIN FOR BURNED LAND DISCRIMINATION, INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 23 (23), S. 5103 - 5110

CHUVIECO, E., VENTURA, G., MARTÍN, M.P., GÓMEZ, J. (2005): ASSESSMENT OF MULTITEMPORAL COMPOSITING TECHNIQUES OF MODIS AND AVHRR IMAGES FOR BURNED LAND MAPPING, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 94, S. 450 - 462

CONGALTON, R. (1993): A PRACTICAL LOOK AT THE SOURCES OF CONFUSION IN ERROR MATRIX GENERATION, IN: PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING, VOL. 59, NO. 5, S. 641-644

COSTA, N. D., HUBBARD, N., WINTER, R. (2002): GMES INITIATIVE, IN: BEGNI, G. (HRSG): OBSERVING OUR ENVIRONMENT FROM SPACE, NEW SOLUTIONS FOR A NEW MILLENNIUM, S. 23 – 29

CUMMING, I. G. & WONG, F. H. (2005): DIGITAL PROCESSING OF SYNTHETIC APERTURE RADAR DATA, ARTECH HOUSE, NORWOOD

DAGRAS, CH., DURAN, M., ZARROUATI, O. (1995): THE SPOT 5 MISSION, IN: ACTA ASTRONAUTICA, VOL. 35, NO. 9-11, S. 651-660

DE SANTIS, A. & CHUVIECO, E. (2007): BURN SEVERITY ESTIMATION FROM REMOTELY SENSED DATA: PERFORMANCE OF SIMULATION VERSUS EMPIRICAL MODELS, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOLUME 108, ISSUE 4, S. 422 – 435

DEFINIENS AG (2010): DEFINIENS: UNDERSTANDING IMAGES: ECOGNITION DEVELOPER 8.0.1 REFERENCE BOOK

DELENNE, S., DURRIEU, S., RABATEL, G., DESHAYES, M. (2008): A LOCAL FOURIER TRANSFORM APPROACH FOR VINE PLOT EXTRACTION FROM AERIAL IMAGES, IN: BLASCHKE, T. (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 443 – 457

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (HRSG) (2009): TERRASAR-X: DAS DEUTSCHE RADAR-AUGE IM ALL, KÖLN

DULL, C. W. & LEE, B. S. (2001): SATELLITE EARTH OBSERVATION INFORMATION REQUIREMENTS OF THE WILDLAND FIRE MANAGEMENT COMMUNITY, IN: AHERN, F. (HRSG): GLOBAL AND REGIONAL VEGETATION FIRE MONITORING FROM SPACE: PLANNING A COORDINATED INTERNATIONAL EFFORT, THE HAGUE, NIEDERLANDE, S. 19 - 35

EPTING, J., VERBYLA, D., SORBEL, B. (2005): EVALUATION OF REMOTELY SENSED INDICES FOR ASSESSING BURN SEVERITY IN INTERIOR ALASKA USING LANDSAT TM AND ETM+, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 96, S. 328 – 339

ERDAS, INC. (2009): ERDAS IMAGINE ON-LINE DOCUMENTATION

ESCH, T. (2006): AUTOMATISIERTE ANALYSE VON SIEDLUNGSFLÄCHEN AUF DER BASIS HÖCHSTAUFLÖSENDE RADAR DATEN, DISSERTATION DER BAYERISCHEN JULIUS-MAXIMILIANS UNIVERSITÄT WÜRZBURG

EVA, H. D., BELWARD, A. S., GRÉGOIRE, J-M., MOULA, M., BRUSTET, J. M., JANODET, E., VIOVY, N. (1995): THE APPLICATION OF ALONG TRACK SCANNING RADIOMETER TO BURNT AREA MAPPING IN DIFFERENT SAVANNAH ECOSYSTEMS IN CENTRAL AFRICA, PROCEEDINGS OF THE 1995 METEOROLOGICAL SATELLITE DATA USER'S CONFERENCE, WINCHESTER, S. 201 - 208

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) (2007): FIRE MANAGEMENT-GLOBAL ASSESSMENT 2006, A THEMATIC STUDY PREPARED IN THE FRAMEWORK OF THE GLOBAL FOREST RESOURCE ASSESSMENT 2005, FAO FOREST PAPER, S. 1 – 121

FERNÁNDEZ, A., ILLERA, P., CASANOVA, J. L. (1997): AUTOMATIC MAPPING OF SURFACES BY FOREST FIRES IN SPAIN USING AVHRR NDVI COMPOSITE IMAGE DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 60, S. 153-162

FLOYD, M.H. (HRSG) (1998): PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF IMAGING RADAR, NEW YORK

FOODY, G. M. (2006): THE EVALUATION AND COMPARISON OF THEMATIC MAPS DERIVED FROM REMOTE SENSING, IN: 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL ACCURACY ASSESSMENT IN NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

FOX, D. M., MASELLI, F., CARREGA, P. (2008): USING SPOT IMAGES AND FIELD SAMPLING TO MAP BURN SEVERITY AND VEGETATION FACTORS AFFECTING POST FOREST FIRE EROSION RISK, IN: CATENA, VOLUME, 75, ISSUE, 3, S. 326 – 335

FRASER, R. H., LI, Z., CIHLAR, J. (2000): HOTSPOT AND NDVI DIFFERENCING SYNERGIE (HANDS): A NEW TECHNIQUE FOR BURNED AREA MAPPING OVER BOREAL FOREST, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOLUME 74, ISSUE 3, S. 362 - 376

FRASER, R. H. & LI, Z. (2002): ESTIMATING FIRE RELATED PARAMETERS IN BOREAL FOREST USING SPOT VEGETATION, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOLUME 82, ISSUE 1, S. 95 - 110

FRASER, R. H., FERNANDES, R., LATIFOVIC, R. (2003): MULTI-TEMPORAL MAPPING OF BURNED FOREST OVER CANADA USING SATELLITE-BASED CHANGE METRICS, IN: GEOCARTE INTERNATIONAL, VOL. 18., NO. 2, S. 37 – 48

FREDERIKSEN, P., LANGAAS, S., MBAYE, M., (1990): NOAA-AVHRR AND GIS-BASED MONITORING OF FIRE ACTIVITY IN SENEGAL – A PROVISIONAL METHODOLOGY AND POTENTIAL APPLICATIONS, IN: GOLDAMMER, J. G. (HRSG): FIRES IN TROPICAL BIOTA, SPRINGER-VERLAG, BERLIN, S. 400 - 417

FRENCH, N., BOURGEOU-CHAVEZ, L., WANG, Y., KASISCHKE, E. (1999): INITIAL OBSERVATIONS OF RADARSAT IMAGERY AT FIRE-DISTURBED SITES IN INTERIOR ALASKA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, H. 68, S. 89–94

FROST, V. S., STILES, J. A., SHANMUGAN, K. S., HOLTZMAN, J. C. (1982): A MODEL FOR RADAR IMAGES AND ITS APPLICATION TO ADAPTIVE DIGITAL FILTERING OF MULTIPLICATIVE NOISE, IN: IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, 4, 2, S. 157 – 166

GÄHLER, M. & VOIGT, S. (2008): DESECURE – SATELLITENGESTÜTZTE KRISENINFORMATION FÜR DEUTSCHLAND, IN: BEITRÄGE ZUM 20. AGIT SYMPOSIUM, HERBERT WICHMANN VERLAG, S. 766 - 771

GARCÍA, M. & CHUVIECO, E. (2004): ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF SAC-C/MMRS IMAGERY FOR MAPPING BURNED AREAS IN SPAIN, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 92, S. 414 – 423

GEORGE, C., ROWLAND, C., GERARD, F., BALZTER, H. (2006): RETROSPECTIVE MAPPING OF BURNT AREAS IN CENTRAL SIBERIA USING A MODIFICATION OF THE NORMALISED DIFFERENCE WATER INDEX, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 104, S. 346 – 359

GIMENO, M. & AYANZ J. (2004) [A]: EVALUATION OF RADARSAT-1 DATA FOR IDENTIFICATION OF BURNT AREAS IN SOUTHERN EUROPE, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, H. 92, S. 370–375

GIMENO, M., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., SCHMUCK, G. (2004) [B]: IDENTIFICATION OF BURNT AREAS IN MEDITERRANEAN FOREST ENVIRONMENTS FROM ERS-2 SAR TIME SERIES, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 25: 22, S. 4873-4888

GITAS, I., DE SANTIS, A., MITRI, G. H. (2009): REMOTE SENSING OF BURN SEVERITY, IN: CHUVIECO (HRSG): EARTH OBSERVATION OF WILDLAND FIRES IN MEDITERRANEAN ECOSYSTEMS, SPRINGER, S. 129 - 149

GITAS, I., MITRI, G. H., VENTURA, G. (2004): OBJECT-BASED IMAGE CLASSIFICATION FOR BURNED AREA MAPPING OF CREUS CAPE, SPAIN, USING NOAA-AVHRR IMAGERY, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 92, S. 409 – 413

GLEYZES, J-P., MEYGRET, A., FRATTER, C., PANEM, C., BAILLARIN, S., VALOREGE, C. (2003): SPOT5: SYSTEM OVERVIEW AND IMAGE GROUND SEGMENT, IN: IEEE, GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, VOL. 1, S. 300 - 302

GUPTA, K. K. & GUPTA, R. (2007): DESPECKLE AND GEOGRAPHICAL FEATURE EXTRACTION IN SAR IMAGES BY WAVELET TRANSFORM, IN: ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING, 62, S. 473 – 484

HLAVKA, C. A., AMBROSIA, V. G., BRASS, J. A., REZENDEZ, A. R., GUILD, L. S. (1996): MAPPING FIRE SCARS IN THE BRAZILIAN CERRADO USING AVHRR IMAGERY, IN: LEVINE JS (HRSG): BIOMASS BURNING AND GLOBAL CHANGE, MIT PRESS, CAMBRIDGE, S. 555-560

HOFRICHTER, R. ET AL. (2001): GEOGRAPHIE UND KLIMA, IN: HOFRICHTER, R. (HRSG): DAS MITTELMEER, FAUNA, FLORA, ÖKOLOGIE, SPEKTRUM VERLAG

HOLECZ, F., E. MEIER, J. PIESBERGEN, NÜESCH, D. (1993): "TOPOGRAPHIC EFFECTS ON RADAR CROSS SECTION, SAR CALIBRATION WORKSHOP" PROCEEDINGS OF CEOS CALIBRATION SUB-GROUP, ESTEC, NOORDWIJK, 1993

HUETE, A. R. (1988): A SOIL-ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI), IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOLUME 25, ISSUE 3, S. 295 – 309

IPCC (2007): CLIMATE CHANGE 2007: MITIGATION, CONTRIBUTION OF WORKING GROUP III TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [B. METZ, O.R. DAVIDSON, P.R. BOSCH, R. DAVE, L.A. MEYER (EDS)], CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, UNITED KINGDOM AND NEW YORK, NY, USA

JAKUBAUSKAS, M. E., LULLA, K. P., MAUSEL, P. W. (1990): ASSESSMENT OF VEGETATION CHANGE IN A FIRE-ALTERED FOREST LANDSCAPE, PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, 56, S. 371 – 377

JIA, G. J., BURKE, I. C., GOETZ, A. F. H., KAUFMANN, M. R., KINDEL, B. C. (2006): ASSESSING SPATIAL PATTERNS OF FOREST FUEL USING AVIRIS DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOLUME 102, ISSUES 3-4, S. 318 – 327

JRC (JOINT RESEARCH CENTRE) (2009): FOREST FIRES IN EUROPE 2008, IN: JRC SCIENTIFIC AND TECHNICAL REPORTS, REPORT NUMBER 9, ITALY

JUSTICE, C. O. & KORONZTI, S. (2001): A REVIEW OF THE STATUS OF SATELLITE FIRE MONITORING AND THE REQUIREMENTS FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE RESEARCH, IN: AHERN, F. (HRSG): GLOBAL AND REGIONAL VEGETATION FIRE MONITORING FROM SPACE: PLANNING A COORDINATED INTERNATIONAL EFFORT, S. 1 – 19

KAMAGATA, N., HARA, K., MORI, M., AKAMATSU, Y., LI, Y., HOSHINO, Y. (2008): OBJECT-BASED CLASSIFICATION OF IKONOS DATA FOR VEGETATION MAPPING IN CENTRAL YAPAN, IN: BLASCHKE, T. (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 459 – 477

KARSZENBAUM, H., TIFFENBERG, J., GRINGS, F., MARINEZ, J., KANDUS, P., PRATOLONGO, P. (2003): A SAR TIME SERIES ANALYSIS TOOLBOX FOR EXTRACTING FIRE AFFECTED AREAS IN WETLANDS, IN: IEEE, VOL. 6, S. 4107 - 4109

KASISCHKE E. S., FRENCH, N. H. F., HARELL, P., CHRISTENSEN, N. L., USTIN, S. L., & BARRY, D. (1993): MONITORING WILDFIRES IN BOREAL FORESTS USING LARGE

AREA AVHRR NDVI COMPOSITE IMAGE DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 30, 43 – 54

KASISCHKE, E., BOURGEAU-CHAVEZ L., FRENCH N., HARRELL P., CHRISTENSEN N. (1992): INITIAL OBSERVATIONS ON USING SAR TO MONITOR WILDFIRE SCARS IN BOREAS FORESTS, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, NO. 13: 18, S. 3495–3501

KASISCHKE, E. & FRENCH, H. F. (1995): LOCATING AND ESTIMATING THE AREAL EXTENT OF WILDLAND FIRES IN ALASKAN BOREAL FORESTS USING MULTIPLE-SEASON AVHRR NDVI COMPOSITE DATA, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 51, S. 263 - 265

KENNEDY, R. E. ET AL. (2009): REMOTE SENSING CHANGE DETECTION TOOLS FOR NATURAL RESOURCE MANAGERS : UNDERSTANDING CONCEPTS AND TRADEOFFS IN THE DESIGN OF LANDSCAPE MONITORING PROJECTS, IN : REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 11, S. 1382 – 1396

KEY, C.H. & BENSON, N.C. (2006): LANDSCAPE ASSESSMENT: GROUND MEASURE OF SEVERITY, THE COMPOSITE BURN INDEX; AND REMOTE SENSING OF SEVERITY, THE NORMALIZED BURN RATIO, IN: D.C. LUTES, R.E. KEANE, J.F. CARATTI, C.H. KEY, N.C. BENSON, S. SUTHERLAND, AND L.J. GANGI, FIREMON (2006): FIRE EFFECTS MONITORING AND INVENTORY SYSTEM, USDA FOREST SERVICE, ROCKY MOUNTAIN RESEARCH STATION, OGDEN, UT. GEN. TECH. REP. RMRS-GTR-164-CD: LA 1-51. SEE – [HTTP://FRAMES.NBII.GOV/PROJECTS/FIREMON/FIREMON_LANDSCAPEASSESSMENT.PDF](http://frames.nbii.gov/projects/firemon/firemon_landscapesassessment.pdf)

KOCH, B., JOCHUM, M., IVITS E., DEES, M. (2003): PIXELBASIERTE KLASSIFIZIERUNG IM VERGLEICH UND ZUR ERGÄNZUNG ZUM OBJEKTBASIERTEN VERFAHREN, IN: PHOTOGRAMMETRIE FERNERKUNDUNG GEOINFORMATION, 3, S. 195 – 204

KOUTSIAS, N. & KARTERIS, M. (1999): BURNT LAND MAPPING AT LOCAL SCALE, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): REMOTE SENSING OF LARGE WILDFIRES IN THE EUROPEAN MEDITERRANEAN BASIN, SPRINGER, S. 157 – 187

KOUTSIAS, N. & KARTERIS, M., (2000): BURNED AREA MAPPING USING LOGISTIC REGRESSION MODELING OF A SINGLE POST-FIRE LANDSAT-5 THEMATIC MAPPER IMAGE, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, VOL. 21, NO. 4, S. 673 – 687

KOUTSIAS, N. & KARTERIS (1996): LOGISTIC REGRESSION MODELLING OF THEMATIC MAPPER DATA FOR BURNT AREA MAPPING, ARISTOTELIAN UNIVERSITY OF THESSALONIKI

DEPT. OF FORESTRY AND NATURAL ENVIRONMENT, LAB. OF FOREST MANAGEMENT AND REMOTE SENSING

KOUTSIAS, N., MALLINIS, G., KARTERIS, M. (2009): A FORWARD/BACKWARD PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF LANDSAT-7 ETM + DATA TO ENHANCE THE SPECTRAL SIGNAL OF BURNT SURFACES, IN: ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 64, S. 37 – 46

KUAN, D. T., SAWCHUK, A. A., STRAND, T. C., CHAVEL, P. (1987): ADAPTIVE RESTORATION OF IMAGES WITH SPECKLE, IN: IEEE TRANSACTIONS ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, 35, S. 373 – 383

LANGAAS, S. & KANE, R. (1991): TEMPORAL SPECTRAL SIGNATURES OF FIRE SCARS IN SAVANNA WOODLAND, IN: IEEE, PROCEEDINGS IGARSS 1991, S. 1157 – 1160

LASPONARA, R. (2006): ESTIMATING SPECTRAL SEPARABILITY OF SATELLITE DERIVED PARAMETERS FOR BURNED AREA MAPPING IN THE CALABRIA REGION BY USING SPOT-VEGETATION DATA, IN: ECOLOGICAL MONELLING, 196 (1-2), S. 265 - 275

LAUER, W. & BENDIX, J. (2006): KLIMATOLOGIE, NEU BEARBEITETE UND KORRIGIERTE AUFLAGE, BRAUNSCHWEIG, WESTERMANN, DAS GEOGRAPHISCHE SEMINAR

LEE, J-S. (1980): DIGITAL IMAGE ENHANCEMENT AND NOISE FILTERING BY USE OF LOCAL STATISTICS, IN: IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE 2, 2, S. 165 – 168

LEE, J-S. (1983): DIGITAL IMAGE SMOOTHING AND THE SIGMA FILTER, IN: COMPUTER VISION, GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 24, S. 255 – 269

LEONE, V. ET AL. (2009): HUMAN FACTORS OF FIRE OCCURRENCE IN THE MEDITERRANEAN, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): EARTH OBSERVATION OF WILDLAND FIRES IN MEDITERRANEAN ECOSYSTEMS, SPRINGER VERLAG, S. 149 -179

LEROY, M., & HAUTECOEUR, O. (1999): ANISOTROPY-CORRECTED VEGETATION INDEXES DERIVED FROM POLDER ADEOS, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 37, S. 1698-1708

LIEW, S. C., LIM, A., KWOH, L. K. (2006): DERIVING OPTIMAL THRESHOLDS FOR ACTIVE FIRE DETECTION, IN: IEEE, GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, S. 3287 - 3289

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J. W. (2004): REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION, 5. AUFLAGE, HOBOKEN

LOEW, A. & MAUSER, W. (2006): GENERATION OF GEOMETRICALLY AND RADIOMETRICALLY TERRAIN CORRECTED SAR IMAGE PRODUCTS, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 106, S. 337 – 349

LOPES, A., NEZRY, E., TOUTI, R., LAUR, H. (1993): STRUCTURE DETECTION AND STATISTICAL ADAPTIVE SPECKLE FILTERING IN SAR IMAGES, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 14, 9, S. 1735 – 1758

LU, D., MAUSEL P., BRONDIZIO, E., MORAN, E. (2004): CHANGE DETECTION TECHNIQUES. IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, VOL. 25, NO. 12, S. 2365–2407

LÜBKER, T. & SCHAAB, G. (2009): IDENTIFYING BENEFITS OF PRE-PROCESSING LARGE AREA QUICKBIRD IMAGERY FOR OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, IN: BLASCHKE (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 203 – 221

MAHMOOD, A. ET AL. (2005): INTERNATIONAL CHARTER 'SPACE AND MAJOR DISASTERS' STATUS REPORT, IN: IEEE, GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, VOL. 6, S. 4362 - 4365

MARGARIS, N. S., KOUTSIDOU, E., GIORGA, CH. (1996): CHANGES IN TRADITIONAL MEDITERRANEAN LAND-USE SYSTEMS, IN: BRANDT, C. J., THORNES, J. B. (HRSG): MEDITERRANEAN DESERTIFICATION AND LAND USE, WILEY VERLAG

MARTÍN, M.P., CECCATO P., FLASSE, S., DOWNEY, J. (1999): FIRE DETECTION AND FIRE GROWTH MONITORING USING SATELLITE DATA, IN: CHUVIECO (HRSG): REMOTE SENSING OF LARGE WILDFIRES IN THE EUROPEAN MEDITERRANEAN BASIN, S. 101 – 122

MARTÍN, M. P. & CHUVIECO, E. (1995): MAPPING AND EVALUATION OF BURNED LAND FROM MULTITEMPORAL ANALYSIS OF AVHRR NDVI IMAGES, EARSEL ADVANCES IN REMOTE SENSING, 4(3), S. 7 – 13

MARTÍN, M.P. (1998): CARTOGRAFÍA E INVENTARIO DE INCENDIOS FORESTALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA A PARTIR DE IMÁGENES NOAA-AVHR, PH.D. THESIS, UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, ALCALÁ DE HENARES

MEIER, E., FREI U., NUESCH, D. (1993): PRECISE TERRAIN CORRECTED GEOCODED IMAGES, SAR GEOCODING, DATA AND SYSTEM, WICHMANN VERLAG

MENGES, C., BARTOLO, R., BELL, D., HILL, G. (2004): THE EFFECT OF SAVANNA FIRES ON SAR BACKSCATTER IN NORTHERN AUSTRALIA, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, H. 25: 22, S. 4857–4871

MILLER, J. D. & THODE, A. E. (2007): QUANTIFYING BURN SEVERITY IN A HETEROGENEOUS LANDSCAPE WITH A RELATIVE VERSION OF THE DELTA NORMALIZED BURN RATIO (DNBR), IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOLUME 109, ISSUE 1, S. 66 – 80

MITRI, G.H. & GITAS, I. Z. (2004): A SEMI-AUTOMATED OBJECT-ORIENTED MODEL FOR BURNED AREA MAPPING IN THE MEDITERRANEAN REGION USING LANDSAT-TM IMAGERY, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF WILDLAND FIRE, 13, S. 367-376

NAKAYAMA, M. & SIEGERT, F. (2001): COMPARATIVE STUDY ON C AND L BAND SAR FOR FIRE SCAR MONITORING, PAPER PRESENTED AT THE 22ND ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 5-9 NOV. 2001, SINGAPORE, COPYRIGHT CENTRE FOR REMOTE IMAGING, SENSING AND PROCESSING, NATIOAL UNIVERSITY SINGAPORE

NEUBERT, M., HEROLD, H., MEINEL, G. (2009): ASSESSING IMAGE SEGMENTATION QUALITY – CONCEPTS, METHODS AND APPLICATION, IN: BLASCHKE (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 769 – 785

NEUBERT, M. (2006): BEWERTUNG, VERARBEITUNG UND SEGMENTBASIERTE AUSWERTUNG SEHR HOCH AUFLÖSENDE SATELLITENBILDDATEN VOR DEM HINTERGRUND LANDSCHAFTSPLANERISCHER UND LANDSCHAFTSÖKOLOGISCHER ANWENDUNGEN, TECHN. UNIV., DISS.--DRESDEN, 2005. BERLIN, RHOMBOS-VERLAG

NICOLAS, J-M. & ADRAGNA, F. (2008): THE PRINCIPLES OF SYNTHETIC APERTURE RADAR, IN: MAÎTRE, H. (HRSG): PROCESSING OF SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGES, S. 25 – 54

NIEMEYER, I., MARPU, P.R., NUSSBAUM, S., (2008): CHANGE DETECTION USING OBJECT FEATURES, IN: BLASCHKE (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 185 – 203

NORTON, J., GLENN, N., GERMINO, M., WEBER, K., SEEFELDT, S., (2009): RELATIVE SUITABILITY OF INDICES DERIVED FROM LANDSAT ETM+ AND SPOT5 FOR DETECTING FIRE SEVERITY IN SAGEBRUSH STEPPE, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION, 11, S. 360 – 367

PAUSAS, J. G. & VALLEJO, V. R. (1999): THE ROLE OF FIRE IN EUROPEAN MEDITERRANEAN ECOSYSTEMS, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): REMOTE SENSING OF LARGE WILDFIRES IN THE EUROPEAN MEDITERRANEAN BASIN, SPRINGER VERLAG, S. 3 – 16

PEREIRA, M.C. & SETZER, A.W. (1993): SPECTRAL CHARACTERISTICS OF DEFORESTATION FIRES IN NOAA/AVHRR IMAGES, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 14, S. 2061-2078

PEREIRA, J., SÁ A. C. L., SOUSA, A. M. O., SILVA, J. M. N., SANTOS, T. N., CARREIRAS, J. M. B. (1999): SPECTRAL CHARACTERISATION AND DISCRIMINATION OF BURNT AREAS, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): REMOTE SENSING OF LARGE WILDFIRES IN THE EUROPEAN MEDITERRANEAN BASIN, S. 123 – 138

PHUA, M., TSUYUKI, S., LEE J., SASAKAWA, H. (2007): DETECTION OF BURNED PEAT SWAMP FOREST IN A HETEROGENEOUS TROPICAL LANDSCAPE: A CASE STUDY OF THE KILAS PENINSULA, SABAH, MALAYSIA, IN: LANDSCAPE AND URBAN PLANING, VOL. 82, ISSUE 3, S. 103 - 116

PINTY, B. & VESTRAETE, M.M. (1992): GEMI: A NON-LINEAR INDEX TO MONITOR GLOBAL VEGETATION FROM SATELLITES, VEGETATION, 101, S. 15-2

PITZ, W. & MILLER, D. (2010): THE TERRASAR-X SATELLITE, IN: IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 48, NO. 2, S. 615 – 622

POZO, D., OLMO, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. (1997): FIRE DETECTION AND GROWTH MONITORING USING A MULTITEMPORAL TECHNIQUE AN AVHRR MID-INFRARED AND THERMAL CHANNELS, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 60, S. 111 – 120

PYNE, S. J. (2009): INTERNAL FLAME: AN INTRODUCTION TO THE FIRE HISTORY OF THE MEDITERRANEAN, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): EARTH OBSERVATION OF WILDLAND FIRES IN MEDITERRANEAN ECOSYSTEMS, SPRINGER, S. 11 – 27

QI, J. ET AL. (1994): A MODIFIED SOIL ADJUSTED VEGETATION INDEX, IN: REMOTE SENSING ENVIRONMENT, 48, S. 119 – 126

RADOUX, J., DEFOURNY, P. (2009): QUALITY ASSESSMENT OF SEGMENTATION RESULTS DEVOTED TO OBJECT-BASED CLASSIFICATION, IN: BLASCHKE (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 257 – 273

RANSON, K.J., KOVACS, K., SUN, G., KHARUK, V.I. (2001): FIRE SCAR DETECTION USING JERS, ERS, AND RADARSAT DATA IN THE BOGUCHANY AREA, EASTERN SIBERIA, CEOS-SAR01-073

REISIGL, H. (2001): VEGETATIONSLANDSCHAFTEN UND FLORA DES MITTELMEERRAUMES, IN: HOFRICHTER, R. (HRSG): DAS MITTELMEER, FAUNA, FLORA, ÖKOLOGIE

REMMEL, T. & PEREIRA, A. (2000): FIRE MAPPING IN A NORTHERN BOREAL FOREST: ASSESSING AVHRR/NDVI METHODS OF CHANGE DETECTION, IN: FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 152, S. 119 – 129

RICHTER, R. (2010): ATMOSPHERIC / TOPOGRAPHIC CORRECTION FOR SATELLITE IMAGERY – ATCOR-2/3 USER GUIDE, VERSION 7.1, JANUARY 2010, GERMAN AEROSPACE CENTER, REMOTE SENSING DATA CENTER

RIEDEL, T., THIEL, C., SCHMULLIUS, C. (2008): FUSION OF MULTISPECTRAL OPTICAL AND SAR IMAGES TOWARDS OPERATIONAL LAND COVER MAPPING IN CENTRAL EUROPE, IN: BLASCHKE (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, S. 493-513

ROSS, S. L. & ELVIDGE, C. (HRSG) (1999): REMOTE SENSING CHANGE DETECTION: ENVIRONMENTAL MONITORING METHODS AND APPLICATIONS, TAYLOR & FRANCIS

ROTH, A., EINEDER, M., SCHÄTTLER, B. (2002): TERRASAR-X: A NEW PERSPECTIVE FOR APPLICATIONS REQUIRING HIGH RESOLUTION SPACEBORNE SAR DATA, COMMISSION VI, WG VI/4

ROTHER, K. (1993): DER MITTELMEERRAUM. EIN GEOGRAPHISCHER ÜBERBLICK, TEUBNER STUDIENBÜCHER

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. (1973): MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS, THIRD ERTS SYMPOSIUM, NASA SP-351 I, S. 309-317

ROY, D., LEWIS, P., JUSTICE, C. (2002): BURNED AREA MAPPING USING MULTI-TEMPORAL MODERATE SPATIAL RESOLUTION DATA - A BI-DIRECTIONAL REFLECTANCE MODEL-BASED EXPECTATION APPROACH, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, H. 83, S. 263–286

ROY, D., JIN, Y., LEWIS, P. E., JUSTICE, C. O. (2005): PROTOTYPING A GLOBAL ALGORITHM FOR SYSTEMATIC FIRE-AFFECTED AREA MAPPING USING MODIS TIME SERIES DATA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 97, S. 137 – 162

ROY, D., TRIGG, S. N., BHIMA, R., BROCKETT, B., DUBE, O., FROST, P., GOVENDER, N., LANDMANN, T., LE ROUX J., LEOPONO, T., (2006): THE UTILITY OF SATELLITE FIRE PRODUCT ACCURACY INFORMATION – PERSPECTIVES AND RECOMMENDATIONS FROM THE SOUTHERN AFRICA FIRE NETWORK, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 44, S. 1928 - 1930

SAN-MIGUEL-AYANZ, J. ET AL. (2009): FOREST FIRES IN THE EUROPEAN MEDITERRANEAN REGION: MAPPING AND ANALYSIS OF BURNED AREAS, IN: CHUVIECO, EARTH OBSERVATION OF WILDLAND FIRES, S. 189 – 203

SARMAP (2009): SYNTHETIC APERTURE RADAR AND SARSCAPE: THE EARTH OBSERVATION INFORMATION GATEWAY

SCHIEWE, J. (2002): SEGMENTATION OF HIGH-RESOLUTION REMOTELY SENSED DATA – CONCEPTS, APPLICATIONS AND PROBLEMS, IN: SYMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING AND APPLICATIONS, SYMPOSIUM SUR LA THÉORIE, LES TRAITEMENTS ET LES APPLICATIONS DES DONNÉES GÉOSPATIALES, 2002, OTTAWA

SCHRÖDER, T. A ET AL (2006): RADIOMETRIC CORRECTION OF MULTI-TEMPORAL LANDSAT DATA FOR CHARACTERIZATION OF EARLY SUCCESSIONAL FOREST PATTERNS IN WESTERN OREGON, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 103, S. 16 – 26

SHEFALI, A. (2004): EARTH RESOURCES SATELLITES, IN: SIVAKUMAR, M.V.K., ROY P. S., HARMSSEN, K., SAHA, S. K. (HRSG): SATELLITE REMOTE SENSING AND GIS APPLICATIONS IN AGRICULTURAL METEOROLOGY, PROCEEDINGS OF THE TRAINING WORKSHOP 7 – 11 JULY 2003, DEHRA DUN, INDIA

SIEGERT, F. & RUECKER, G. (2000): USE OF MULTITEMPORAL ERS-2 SAR IMAGES FOR IDENTIFICATION OF BURNED SCARS IN SOUTH-EAST ASIAN TROPICAL RAINFOREST, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, H. 21: 4, S. 831–837

SILVA, J., SÀ, A., PEREIRA, J. (2005): COMPARISON OF BURNED AREA ESTIMATES DERIVED FROM SPOT-VEGETATION AND LANDSAT ETM+ DATA IN AFRICA: INFLUENCE OF SPATIAL PATTERN AND VEGETATION TYPE, 96, S. 188 – 201

STOLLE, F ET AL. (2004): EVALUATION OF REMOTE SENSING-BASED ACTIVE FIRE DATASETS IN INDONESIA, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, VOL. 25, NO. 2, S. 471 – 479

STROPPIANA, D., BOSCHETTI, M., ZAFFARONI, P., BRIVIO, P. A. (2009): ANALYSIS AND INTERPRETATION OF SPECTRAL INDICES FOR SOFT MULTICRITERIA BURNED-AREA MAPPING IN MEDITERRANEAN REGIONS, IN: IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOLUME 6, ISSUE 3, S. 499 – 503

STROPPIANA, D., PINNOCK, S., PEREIRA, J., GRÈGOIRE, J-M. (2002): RADIOMETRIC ANALYSIS OF SPOT-VEGETATION IMAGES FOR BURNT AREA DETECTION IN NORTHERN AUSTRALIA, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 82, S. 21 – 37

SUGIHARA, N. G., VAN WAGTENDONK, J. W., SHAFFER, K. E., FITES-KAUFMANN, J. & THODE, A. E. (HRSG) (2006): FIRE IN CALIFORNIA ECOSYSTEMS, BERKELEY, CA: UNIVERSITY OF CALIFORNIA PRESS

SVEINSSON, J. R., WASKE, B., BENEDIKTSSON J. A. (2009): SPECKLE REDUCTION OF TERRASAR-X IMAGERY USING TV SEGMENTATION, IN: IEEE, IV, S. 458 – 461

SWAIN, P.H. & DAVIS, S. M. (1978): REMOTE SENSING: THE QUANTITATIVE APPROACH, NEW YORK, MCGRAW-HILL, CHAPTER 3

TANASE, M. PÉREZ-CABELLO F. RIVA J. SANTORO M. (2010): TERRASAR-X DATA FOR BURN SEVERITY EVALUTION IN MEDITERRANEAN FORESTS ON SLOPED TERRAIN. IN: IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, H. VOL. 48, NO. 2, S. 917 - 929

THIEL, CH., THIEL, CA., RIEDEL, T., SCHMULLIUS, C. (2008): OBJECT-BASED CLASSIFICATION OF SAR DATA FORT HE DELINEATION OF FOREST COVER MAPS AND THE DETECTION OF DEFORESTATION – A VIABLE PROCEDURE AND IST APPLICATION IN GSE FOREST MONITORING, IN: BLASCHKE (HRSG): OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS

VIDAL-PANTALEONI, A. & D. MARTI (2004): COMPARISON OF DIFFERENT SPECKLE-REDUCTION TECHNIQUES IN SAR IMAGES USING WAVELET TRANSFORM, IN: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 25, 22, S. 4915 – 4932

VIEGAS, D. X., RIBEIRO, L. M., VIEGAS, M. T., PITA, L. P., ROSSA, C. (2009): IMPACTS OF FIRE ON SOCIETY: EXTREME FIRE PROPAGATION ISSUES, IN: CHUVIECO, E. (HRSG): EARTH OBSERVATION OF WILDLAND FIRES IN MEDITERRANEAN ECOSYSTEMS, SPRINGER VERLAG, S. 97 - 109

WAGTENDONK, J. W., ROOT, R. R., KEY, C. H. (2004): COMPARISON OF AVIRIS AND LANDSAT ETM+ DETECTION CAPABILITIES FOR BURN SEVERITY, IN: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 92, S. 397 – 408

WWF (WORLD WIDE FUND FOR NATURE) (2008): WÄLDER IN FLAMMEN – URSACHEN UND FOLGEN DER WELTWEITEN WALDBRÄNDE, AUTOR: HIRSCHBERGER, P., FRANKFURT AM MAIN

INTERNETQUELLEN:

<u>www.disasterscharter.org</u>	letzter Aufruf: 10. 07. 2010
<u>www.zki.dlr.de</u>	letzter Aufruf: 11. 07. 2010
<u>www.corine.dfd.dlr.de</u>	letzter Aufruf: 26. 03. 2010
<u>www.eea.europa.eu</u>	letzter Aufruf: 26. 03. 2010
<u>www.fe-lexikon.info</u>	letzter Aufruf: 11. 05. 2010
<u>www.modtran.org</u>	letzter Aufruf: 26. 05. 2010
<u>www. effis.jrc.ec.europa.eu</u>	letzter Aufruf: 15. 10. 2010

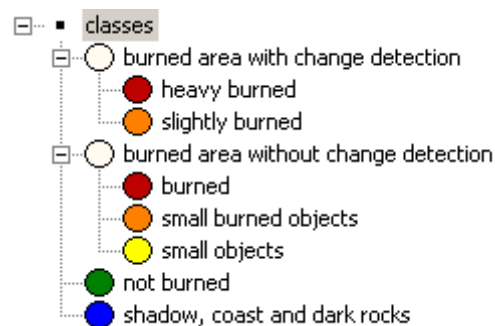
Anhang

Hier sei vermerkt, dass der gesamte Algorithmus zur Brandflächendetektion für die ZKI-Krisenkartierung in englischer Sprache verfasst wurde.

Anhang 1:

Optischer monotemporaler und multitemporaler Algorithmus zur Brandflächendetektion



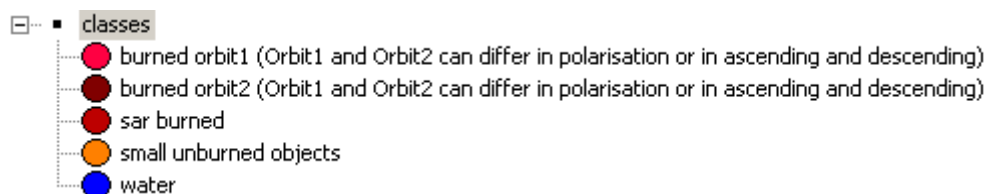


Anhang 2:

Benutzerschnittstelle des optischen monotemporalen und multitemporalen Algorithmus zur Brandflächendetektion

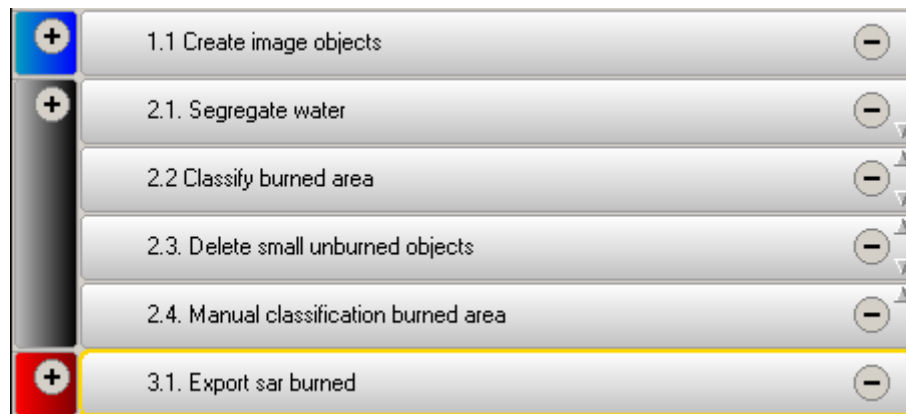
Anhang 3:

Algorithmus des Radar-Verfahrens zur Brandflächendetektion



Anhang 4:

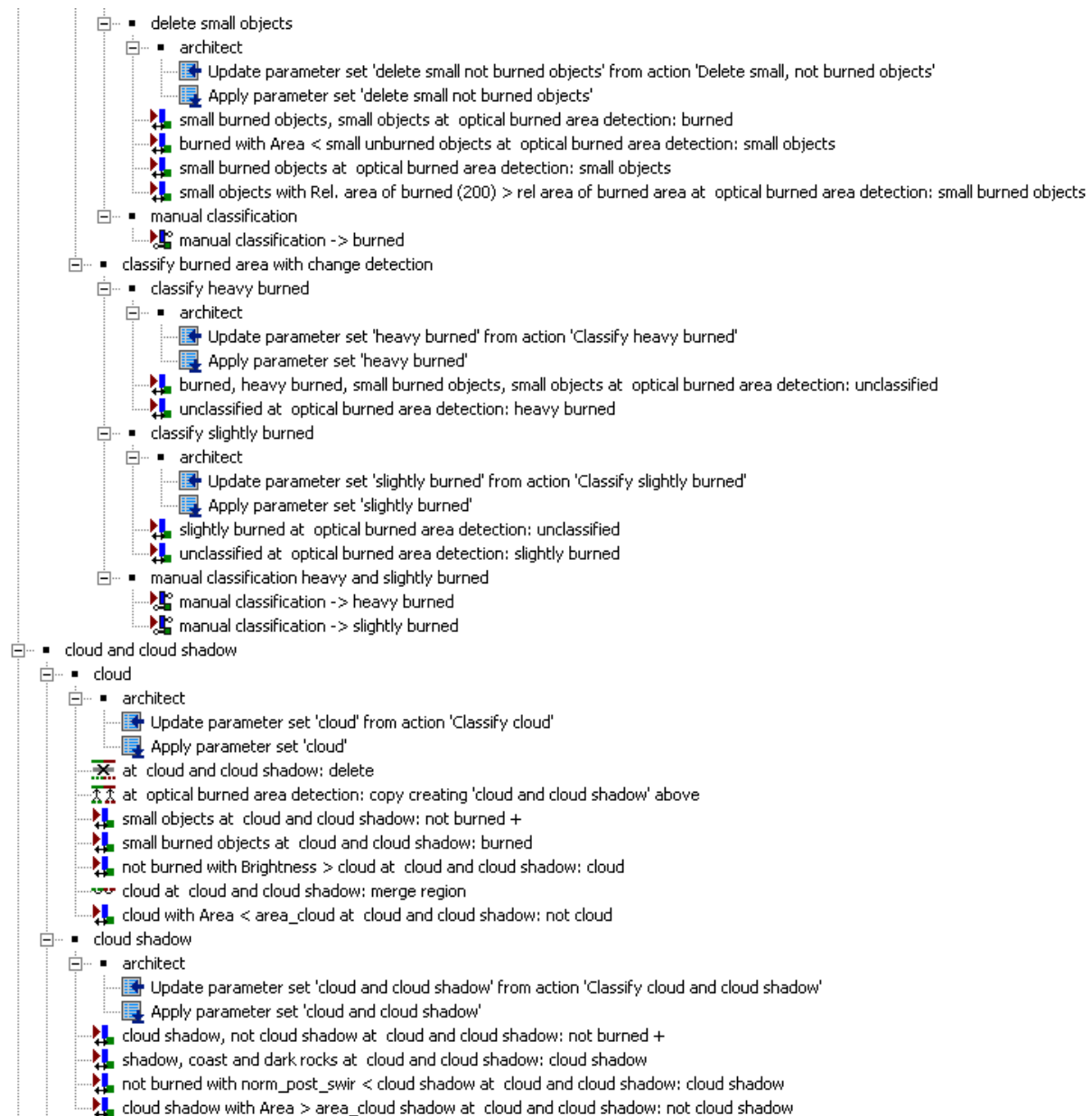
Benutzerschnittstelle des Radar-Algorithmus zur Brandflächendetektion



Anhang 5:

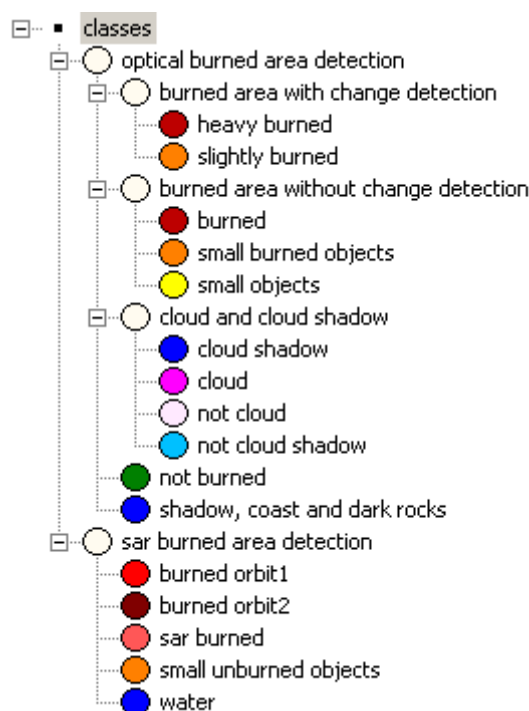
Algorithmus der Kombination des optischen- und Radar-Verfahrens zur Brandflächendetektion











Anhang 6:

Benutzerschnittstelle des Kombinationsverfahrens zur Brandflächendetektion



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die von mir eingereichte Diplomarbeit zum Thema „*Brandflächendetektion im mediterranen Raum auf Basis von SPOT 5 und TerraSAR-X Satellitendaten*“ selbständig und nur unter ausschließlicher Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur und sonstigen Quellen angefertigt wurde. Indirekt übernommene Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

München, den 17. September 2010